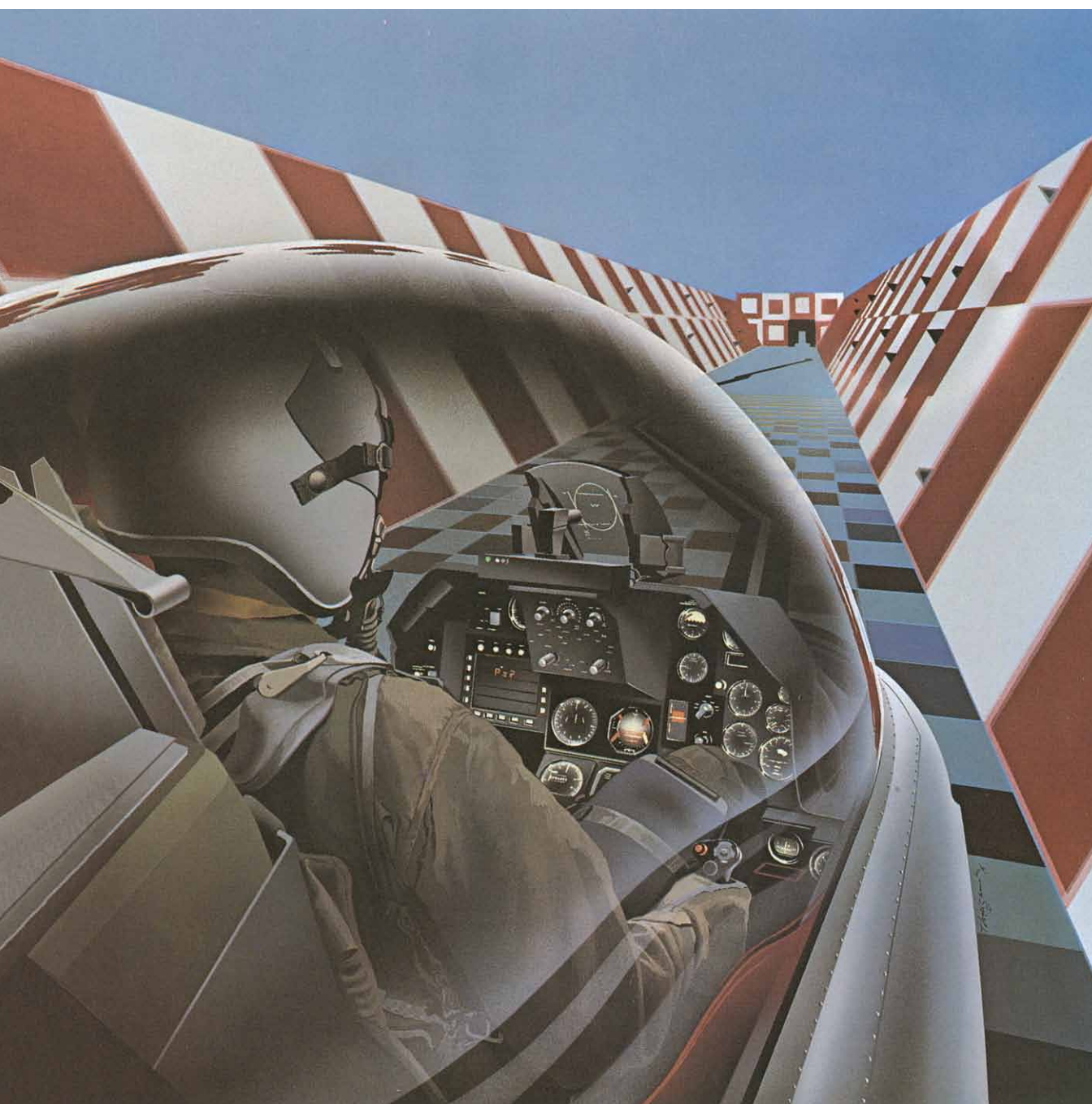


INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**



SIMULACION DE VUELO

Septiembre 1986

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

- 8 **EL HORMIGON LIGERO, Domingo Pellicer**
Su limitado empleo por falta de información lo convierte en un material desaprovechado.
- 18 **MACROESTRUCTURAS DEL UNIVERSO, Jack O. Burns**
Los cúmulos galácticos se agrupan en enormes supercúmulos separados por vacíos inmensos.
- 30 **ANTI-IDIOTIPOS E INMUNIDAD, Ronald C. Kennedy, Joseph L. Melnick y Gordon R. Dreesman** Reconocen la individualidad molecular de otros anticuerpos.
- 44 **ESTRUCTURA DE LAS CORDILLERAS, Peter Molnar**
Unas se apoyan en placas de roca dura, otras flotan sobre profundas raíces corticales.
- 54 **NUCLEOS ATOMICOS EXOTICOS, J. H. Hamilton y J. A. Maruhn**
Sus proporciones de neutrones y protones difieren de las habituales en núcleos normales.
- 64 **PERCEPCION DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO POR EL SENTIDO DEL TACTO, Frank A. Geldard y Carl. E. Sherrick** Su análisis informa de la actividad del sistema nervioso.
- 70 **SIMULACION DEL VUELO, Ralph Norman Haber**
La recreación de la escena visual reta la potencia de la tecnología de ordenadores.
- 80 **LA CUTICULA DE LOS ARTROPODOS, Neil F. Hadley**
A ella se debe, en buena parte, el éxito evolutivo alcanzando por ese *phylum* animal.
- 3 AUTORES
- 4 HACE...
- 40 CIENCIA Y SOCIEDAD
- 90 JUEGOS DE ORDENADOR
- 96 TALLER Y LABORATORIO
- 103 LIBROS
- 108 BIBLIOGRAFIA

SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION

Jonathan Piel (Presidente y director), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, Peter G. Brown, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Michael Feirtag, Gregory R. Greenwell, Robert Kunzig, Philip Morrison, James T. Rogers, Armand Schwab, Jr., y Ricki L. Rusting

DIRECCION ARTISTICA PRODUCCION DIRECTOR GENERAL

Samuel L. Howard
Richard Sasso
George S. Conn

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR

Francisco Gracia Guillén

REDACCION

José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa

PRODUCCION

César Redondo Zayas

PROMOCION EXTERIOR

Pedro Clotas Cierco

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Macroestructuras del universo*; Santiago Torres Martínez: *Anti-idiotipos e inmunidad*; Montserrat Domingo: *Estructura de las cordilleras*; Emilio Elizalde: *Núcleos atómicos exóticos*; Natuca Sánchez Sáinz-Trápaga: *Percepción del espacio y del tiempo por el sentido del tacto*; Donato Franco: *Simulación del vuelo*; Manuel Crespo: *La cutícula de los artrópodos*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Ramón Margalef, Carlos M. Cuadras, Agustín Albarracín y E. Rada



PORTADA

La ilustración de la portada muestra la cabina de un simulador del caza F-16, rodeada por una escena imaginaria generada por ordenador. En este simulador el piloto puede practicar a salvo, en tierra, muchas de las tareas de vuelo. De ahí que esos ingenios se utilicen cada vez más en el entrenamiento de pilotos civiles y militares (véase "Simulación del vuelo", por Ralph Normal Haber, en este número). La ilustración se inspira en el simulador ESPRIT, que está construyendo la división de simulación del vuelo de la compañía Singer, en Link. El sistema se ha diseñado para optimizar la potencia de cálculo, siguiendo la dirección de la mirada del piloto en cada instante y presentando con gran detalle sólo la región que queda en la línea de visión (*área circular en el lado derecho de la imagen*). Los programas que simulan el vuelo también están al alcance de los ordenadores personales (véase "Juegos de ordenador", por A. K. Dewdney).

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. \$
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85

Cataluña:

Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente	Página	Fuente
8	D. Pellicer	71	Bob Foster, McDonnell Aircraft Company
10	D. Pellicer (<i>arriba</i>), D. Pellicer y Magda Mária (<i>abajo</i>)	72-75	Ian Worpole
11	D. Pellicer	76	División de Simulación del Vuelo de la Compañía Singer en Link
12	D. Pellicer y Magda Mária	77	Ian Worpole
13	D. Pellicer	78	División de Simulación del Vuelo de la Compañía Singer en Link
14-17	D. Pellicer y Magda Mária	81	Neil F. Hadley y Greg Hendricks
19-20	George V. Kelvin	82	Tom Prentiss y Neil F. Hadley
21	Observatorios Astronómicos	83	Tom Prentiss
22-26	Opticos Nacionales	84	Elizabeth McClain (<i>arriba</i>), Neil F. Hadley (<i>abajo</i>)
27	George V. Kelvin	85	Tom Prentiss
31	Jack O. Burns y J. Ward	86	Barry K. Filshie (<i>arriba</i>), Tom Prentiss y Neil F. Hadley (<i>abajo</i>)
32-38	Moody	87	Neil F. Hadley (<i>arriba</i>), Tom Prentiss (<i>abajo</i>)
45	Daniel Pauletti, Fundación Southwest de Investigación Biomédica	88	Tom Prentiss
46-48	Alan D. Iselin	91-92	James Kilkelly
50	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio	93	Andrew Christie
51	Ian Worpole	94-95	Gabor Kiss
52	Andrew Tomko	97	Charles A. Knight, Centro Nacional de Investigación Atmosférica
53	Ian Worpole	98-102	Michael Goodman
55	Peter Molnar		
56-62	Servicio Aerofotográfico Nacional del Perú		
63	James Kilkelly		
65	George Retseck		
66-69	Peter Möller y J. Rayford Nix		
	James Kilkelly		
	Carol Donner		

ISSN 0210-136X

Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición Tecfa, S.A.

Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.

Gráfica Elzeviriana, S.A.

Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11

08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Copyright © 1986 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 1986 Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

Los autores

DOMINGO PELLICER (“El hormigón ligero”) tiene a su cargo la asignatura Construcciones arquitectónicas en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra, centro que le otorgó el doctorado en 1977. Allí ocupa también la subdirección de la coordinación de las tareas de investigación. Ha dedicado varios años de trabajo al estudio y aplicaciones de los hormigones ligeros estructurales y sus relaciones con el hormigón normal. Colabora en el laboratorio de edificación de ese prestigioso centro universitario privado.

JACK O. BURNS (“Macroestructuras del universo”) es director del Instituto de Astrofísica y profesor adjunto de física y astronomía de la Universidad de Nuevo México. Tras cursar estudios de astrofísica en la Universidad de Massachusetts, los prosiguió en la de Indiana, por la que se recibió de doctor en 1978. Desde ese año hasta 1980 investigó en el Observatorio Nacional de Radioastronomía, incorporándose más tarde al claustro docente de Nuevo México. El tema sobre el que versa su artículo, la cosmología, constituye un área de investigación relativamente nueva en el historial de Burns, pues su interés se había centrado anteriormente en la radioastronomía extragaláctica.

RONALD C. KENNEDY, JOSEPH L. MELNICK y GORDON R. DREESMAN (“Anti-idiotipos e inmunidad”) comparten un mismo interés por las enfermedades víricas y la inmunidad. Kennedy trabaja en la Fundación Southwest de Investigaciones Médicas, de San Antonio, y enseña microbiología en el Hospital Clínico de la Universidad de Texas en San Antonio. Tras doctorarse por la Universidad de Hawai en Manoa, prosiguió su formación bajo la dirección de Melnick y Dreesman, en la Facultad de Medicina Baylor, donde obtuvo plaza de profesor en 1983. Ingresó en la Fundación Southwest en 1984. Melnick es profesor de virología y epidemiología y decano de ciencias de Baylor. Se doctoró en bioquímica por la Universidad de Yale, centro donde ejerció la docencia durante 18 años, trasladándose luego a Baylor, en 1958. Dreesman dirige el departamento de virología de la Fundación Southwest y es catedrático de

virología del Hospital Clínico de la Universidad de Texas y de Baylor. Se doctoró en microbiología por la Universidad de Hawai en Manoa (1965), enseñó en la Facultad de Medicina de la Universidad de San Luis y se incorporó a Baylor en 1969. En 1979 Dreesman ocupó plaza de número en Baylor y, en 1984, ingresó en la Fundación Southwest.

PETER MOLNAR (“Estructura de las cordilleras”) es profesor asociado de ciencias de la tierra, atmosféricas y planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts, puesto que desempeña desde 1978. Licenciado por el Oberlin College, se doctoró en geofísica por la Universidad de Columbia, en 1970. Escribe el autor: “Procuró pasar por lo menos tres meses al año en zonas montañosas remotas, haciendo trabajo de campo y saboreando las virtudes de la cultura indígena correspondiente. En casa, el tiempo libre suelo dedicarlo a esforzarme en aprender algo del idioma de la zona que vaya a visitar a continuación”.

J. H. HAMILTON y J. A. MARUHN (“Núcleos atómicos exóticos”) son, respectivamente, catedrático Landon C. Garland de física de la Universidad de Vanderbilt y profesor asociado de física teórica de la Universidad de Frankfurt. Hamilton cursó el primer ciclo de ciencias en el Mississippi College; se licenció (1956) y doctoró (1958) por la Universidad de Indiana. Concluida su etapa de formación firmó un contrato con la de Vanderbilt, a cuyo claustro pertenece desde entonces. Maruhn estudió en la Universidad de Frankfurt, por la que se doctoró en 1973 defendiendo una tesis sobre las distribuciones de masas en la fisión nuclear. Tras investigar en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge de Tennessee, de 1974 a 1977, regresó a Frankfurt para ocupar su cargo actual en el Instituto de Física Teórica de la Universidad.

FRANK A. GELDARD Y CARL E. SHERRICK (“Percepción del espacio y del tiempo por el sentido del tacto”) han colaborado durante muchos años en la realización de estudios sobre las facultades de la piel en el procesamiento de estímulos. Hasta su fallecimiento, ocurrido en 1984, Geldard

fue profesor honorario de psicología, así como investigador de número de la Universidad de Princeton. Cursó todos sus estudios en la Universidad de Clark. Tras doctorarse en 1928, entró a formar parte del claustro de la Universidad de Virginia. Concluida la guerra permaneció en Virginia hasta 1962, cuando se trasladó a Princeton. Descubrió el fenómeno del salto que se describe en este artículo mientras impartía su último curso de prácticas de laboratorio, antes de retirarse de la docencia, en 1972. Sherrick es psicólogo investigador de número y profesor de psicología de la Universidad de Princeton. Realizó su tesis doctoral en psicología experimental bajo la dirección de Geldard, en la Universidad de Virginia, doctorándose en 1952. Después de un año como adjunto de investigación en Virginia, se trasladó a San Luis, donde impartió clases y realizó investigaciones en la Universidad Central para Sordos. En 1962 regresó a Virginia y poco después marchó con Geldard a Princeton. Sherrick está especialmente interesado en el potencial del tacto como sustituto de los sentidos dañados.

RALPH NORMAN HABER (“Simulación del vuelo”) es profesor de psicología de la Universidad de Illinois. Licenciado en filosofía por la Universidad de Michigan (1953), en psicología por la Universidad de Wesley (1954) y doctor en psicología por la Universidad de Stanford (1957), enseñó en la Universidad de Yale durante seis años y en la de Rochester durante 15, incorporándose luego a Illinois.

NEIL F. HADLEY (“La cutícula de los artrópodos”) es profesor de zoología de la Universidad estatal de Arizona. Cursó estudios en la Universidad de Michigan Oriental y se recibió de doctor por la de Colorado, en 1966, tras lo cual se incorporó al profesorado de la estatal de Arizona. Hadley dirigió *Environmental Physiology of Desert Organisms* (Academic Press, 1975) y es autor de *The Adaptive Role of Lipids in Biological Systems* (John Wiley & Sons, 1985). Su campo de investigación abarca la fisiología comparada y ambiental, con un énfasis especial, en los últimos años, en la retención y pérdida de agua por parte de los artrópodos terrestres.

Hace...

José M.^a López Piñero

...cuatrocientos años

La célebre imprenta veneciana de Aldo Manuzio publicó la segunda edición de la traducción al italiano del *Examen de ingenios para las ciencias*, de Juan Huarte de San Juan, realizada por Camilo Camilli y titulada *Essame de gl'ingegni de gl'huomini, per apprendere la scienza*. Este libro de Huarte fue uno de los textos científicos del siglo xvi que obtuvo más amplia difusión internacional, alcanzando nada menos que ochenta y dos ediciones en siete idiomas con anterioridad a 1800.

Huarte nació en 1529 en San Juan del Pie del Puerto, antigua capital de la sexta merindad del Reino de Navarra, que era todavía una importante plaza fuerte durante el primer cuarto del siglo xvi. Sin embargo, fue desmantelada en 1530, al año siguiente de su nacimiento, ante la dificultad de mantener una línea defensiva más allá de los Pirineos. A partir de esa fecha, emigraron a Castilla muchos de sus habitantes, entre ellos la familia de Huarte, que se estableció en Baeza antes de 1540. Allí cursó estudios Huarte hasta obtener la licenciatura en artes, grado que recibió al parecer en el Colegio-Universidad de Alcalá y seis años más tarde consiguió en ella el grado de doctor. El resto de su vida lo pasó en Linares y Baeza consagrado al ejercicio profesional. Las escasas noticias que tenemos de esas dos décadas proceden de algunos documentos publicados por Iriarte: fue contratado como médico por el Concejo de Baeza, contrajo matrimonio con una mujer procedente también de la Baja Navarra, tenía “casa principal” en Linares y también algunas posesiones en la zona manchega de Tarancón. Dictó testamento el 25 de noviembre de 1588 y falleció seguramente poco después; en todo caso, antes de febrero del año siguiente, en el que ya aparece la documentación de sus herederos.

En la misma ciudad de Baeza publicó Huarte en 1575 la primera edición de su libro *Examen de ingenios para las ciencias* que, como hemos adelantado, es uno de los textos científicos más importantes e influyentes escritos por un autor español.

El tema de la obra es la teoría del

“ingenio” como disposición individual y tipificable de los hombres para el ejercicio de una determinada actividad. Huarte distingue tres “diferencias de ingenio” cuantitativas o “grados de habilidad” y, sobre todo, tres cualitativas. Estas últimas dependen del predominio relativo de una de las tres “potencias racionales”: la “memoria”, la “imaginativa” y el “entendimiento”. La clave de su teoría consiste en afirmar que “los que son rudos en una ciencia tienen en otra mucha habilidad, y los muy ingeniosos en un género de letras, pasados a otras no las pueden comprender”. En consecuencia, tras exponer las generalidades, la obra incluye una serie de capítulos en los que “se da a cada diferencia de ingenio la ciencia que le responde en particular y se le quita la que le es repugnante y contraria”. La palabra “ciencia” tiene para Huarte un sentido muy amplio, que abarca los saberes, sus aplicaciones prácticas y su concreción social en diversas profesiones. En primer término, relaciona positivamente la gramática con la memoria, la dialéctica con el entendimiento y la astronomía con la imaginativa. A continuación, examina las “diferencias de ingenio” que resultan apropiadas para la elocuencia, para el cultivo de la teoría o la práctica de la teología, el derecho, la medicina y el arte militar, así como para desempeñar el “oficio de Rey”. La obra termina con un extenso capítulo sobre “la manera cómo los padres han de engendrar los hijos sabios y del ingenio que requieren las letras”, con consejos contra la esterilidad, “para que salgan varones y no hembras” y “para conservar el ingenio de los niños después de estar formados y nacidos”.

El fundamento del libro de Huarte es la anatomía y la fisiología del galenismo y, de forma inmediata, la doctrina según la cual las facultades del alma se derivan de la complexión humoral del cuerpo, expuesta por Galeno en su tratado *Quod animi mores corporis temperamenta sequantur*. Naturalmente, tuvo que introducir abundantes matizaciones y cautelas para hacerla compatible con los dogmas cristianos de la inmortalidad del alma y el libre albedrío. A pesar de todas ellas, el libro fue primero prohibido en Por-

tugal (1581), apareció después severamente expurgado en los índices del Inquisidor General español Gaspar de Quiroga (1583 y 1584) y, a partir del siglo xvii, se incorporó a los índices de libros prohibidos romanos hasta su desaparición en 1966. Entre las proposiciones condenadas por la Inquisición española, destaca la concepción del entendimiento como “potencia orgánica”. La defensa que Huarte hizo del cerebro como base orgánica del comportamiento humano no fue original, ya que en su exposición se ajustó al más ortodoxo galenismo. No obstante, su formulación clara y vigorosa, en el contexto de una obra de tan extraordinaria difusión, la convirtió en un factor de notable peso en el desarrollo posterior de este capítulo fisiológico: “Ningún filósofo duda en esta era —afirma Huarte— que el cerebro es el instrumento que naturaleza ordenó para que el hombre fuese sabio y prudente. Sólo conviene explicar qué condiciones ha de tener esta parte para que se pueda decir estar bien organizada, y que el muchacho, por esta razón, tenga buen ingenio y habilidad. Cuatro condiciones ha de tener el cerebro para que el ánima racional pueda con él hacer cómodamente las obras que son de entendimiento y prudencia. La primera es buena compostura; la segunda, que sus partes estén bien unidas; la tercera, que el calor no exceda a la frialdad, ni la humedad a la sequedad; la cuarta, que la sustancia esté compuesta de partes sutiles y muy delicadas.

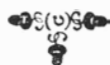
“En la buena composición se encierran otras cuatro cosas. La primera es buena figura; la segunda, cantidad suficiente; la tercera, que en el cerebro haya cuatro ventrículos distintos y apartados, cada uno puesto en su asiento y lugar; la cuarta, que la capacidad de éstos no sea mayor ni menor de lo que conviene a sus obras...”

“La cantidad del cerebro que ha menester el ánima para discurrir y raciocinar es cosa que espanta, porque entre los brutos animales ninguno hay que tenga tantos sesos como el hombre. De tal manera, que si juntásemos los que se hallan en dos bueyes muy grandes, no igualarían con los de solo un hombre por pequeño que fuese, y lo que es más de notar, que entre los brutos animales, aquellos que se van llegando más a la prudencia y discrección humana, como es la mona, la zorra y el perro, éstos tienen mayor cantidad de cerebro que los otros, aunque en corpulencia sean mayores...”

“Fuera de esto, son menester cuatro ventrículos en el cerebro para que el

SCRUTI- NIUM INGENIORUM

pro his,
qui excellere cupiunt;
perpetua lingua Castellana trans-
lacione
latinitate donatum;
interpretis
ÆSCHACIO MAJORE
DOBREBORANO.
Legē: stupeſces.



Cum privilegio S. Cæsaris Majest.
Proſta: Lipſiæ
IN OFFICINA COTHOMIENSI
cla. lxx. XXII

Onderzoek der byzondere VERNFTENS Eigentlijke ABELHEEN.

Op het louterſte betoonende (volgens de
zuiverſte gronde-regulen der naaturlijke
Wijsgeerheydt) tot welk weetſchap,
konſt, of oefening, ieder een
daarom het bequaamſte is.

Tuſſet Spaans beſchreeven door den
DOKTOOR,
JOAN HUARTE,
En daar uyt in het Heer-duyts vertaalt
Door
HENRYK TAKAMA, Amſterdammer.



t'AMSTELDAM,
By JOHANNES VAN RAVESTEYN,
Op't Waer in't Schryff-boek. 1659.

Johann Huarts Prüfung der Köpfe zu den Wiſſenſchaften

Worinne er die
Verſchiedenen Fähigkeiten
die in den Menſchen liegen
zeigt
Einem jeden den
Theil der Gelehrſamkeit beſtimmt
der für ſie eigentlich gehört
Und endlich
den Ältern Aufſchlag erteilt
wie ſie
fähige und zu den
Wiſſenſchaften aufgelegte Söhne
erhalten können

Aus dem Spaniſchen überſetzt
von
Gottbold Ephraim Leſing.
—————
3 2 X B 5 T
Bey der Zummermanniſchen Buchhandlung. 1752.

ESSAME DE GLINGEGNI DEGLI HVOMINI,

Per apprendere la Scienza:
Nel quale, ſcoprendoſi la varietà delle nature, ſi
moſtra, a che profeſſione ſia atto ciaſcuno, &
quanto profeſſo abbia fatto in eſſa:

DI GIO. HVARTE;
Nuovamente tradotto dalla lingua Spagnuola
DA M. CAMILLO CAMIELI.
CON PRIVILEGI.



IN VENETIA, M D XXCII.

Examen de Ingenios. THE EXAMINATION of mens Wits.

In which, by diſcovering the varietie of natures,
is ſhew'd for what profeſſion each one is apt,
and how far he ſhall profit therein.

By John Huars.
Translated out of the Spaniſh tongue by
M. Camillo Camiel.
Engliſhed out of his Italian, by
K. C. Eſquire.



LONDON,
Printed by Adam Jſlip, for
Richard Watkins.
1 5 9 4

ANACRISE, OV PARFAIT IVGEMENT

ET EXAMEN DES
Eſpris propres & naiz
aux ſciences.

Où par merueilleux & viles ſecrets; tirez
tant de la vraye Philoſophie naturelle, que di-
vine, eſt demonſtree la difference des graces
& habilitéz qui ſe trouvent aux hommes, & à
quel genre de lettres eſt convenable l'eſprit
de chaſcun: de maniere que quiconque lira icy
attentivement, découvrira la propriété de ſon
eſprit, & ſçaura éliſer la ſcience en laquelle il
doit profiter le plus.

Compoſé en Eſpagnol par M. Jean Huars
Docteur, naiſſe de S. Jean du pied du
Port, & mis en François, au grand profit
de la Republique, par GABRIEL
CHAPPAIS Tourangeau.

A L T O N,
PAR FRANCOIS DIDIER,
à l'enſeigne du Fenix.

1 5 8 0.
Avec Privilege du Roy.

El Examen de ingenios para las ciencias (1575) fue uno de los textos científicos del siglo XVI que obtuvo más amplia difusión internacional, alcanzando ochenta y dos ediciones en siete idiomas con anterioridad a 1800. Portadas de ediciones en latín, alemán, inglés, holandés, italiano y francés (de izquierda a derecha y de arriba abajo).

ánima racional pueda discurrir y filosofar: el uno ha de estar colocado en el lado derecho, y el segundo en el izquierdo, y el tercero en el medio de estos dos, y el cuarto en la postrera parte del cerebro. De qué sirvan estos ventrículos y las capacidades anchas o angostas del ánima racional, adelante lo diremos tratando de las diferencias de ingenio que hay en el hombre. Pero

también no basta que el cerebro tenga buena figura, cantidad suficiente, y el número de ventrículos que hemos dicho, con su capacidad poca o mucha, sino que sus partes guarden cierto género de continuidad, y que no estén divisas. Por la cual razón hemos visto en las heridas de cabeza, unos hombres perder la memoria, otros el entendimiento, y otros la imaginación, y

puesto caso que después de sanos volvió el cerebro a juntarse, pero no a la unión natural que él tenía de antes.

”La tercera condición de las cuatro principales era el estar el cerebro bien templado con moderado calor y sin exceso de las demás calidades. La cual disposición dijimos atrás que se llamaba buena naturaleza, porque es la que principalmente hace al hombre há-

bil, y la contraria inhábil. Pero la cuarta, que es tener el cerebro la sustancia o compostura de partes sutiles y muy delicadas, dice Galeno que es la más importante de todas, porque, queriendo dar indicio de la buena compostura del cerebro, dice que el ingenio sutil es señal que el cerebro está hecho de parte sutiles y muy delicadas, y si el entendimiento es tardo, arguye gruesa sustancia, y no hace mención del temperamento.

”Estas condiciones ha de tener el cerebro para que el ánima racional pueda hacer con él sus razones y silogismos; pero hay que por medio una dificultad muy grande, y es, que si abrimos la cabeza de cualquier bruto animal, hallaremos que su cerebro está compuesto de la misma forma y manera que el hombre, sin faltarle ninguna condición de las dichas. Por donde se entiende que los brutos animales usan también la prudencia y razón, mediante la compostura de su cerebro, o que nuestra ánima racional no se aprovecha de este miembro por instrumento de sus obras, lo cual no se puede afirmar. A esta duda responde Galeno... aunque con algún miedo, que los brutos animales participan de razón, unos más y otros menos, y dentro de su ánimo usan de algunos silogismos y discursos, puesto caso que no lo puedan explicar por palabras. Y que la diferencia que les hace el hombre consiste en ser más racional y usar de prudencia con más perfección. También el mismo Galeno prueba con muchas experiencias y razones que los asnos (siendo entre los brutos animales los más necios) alcanzan con su ingenio las cosas más sutiles y delicadas que Platón y Aristóteles hallaron...

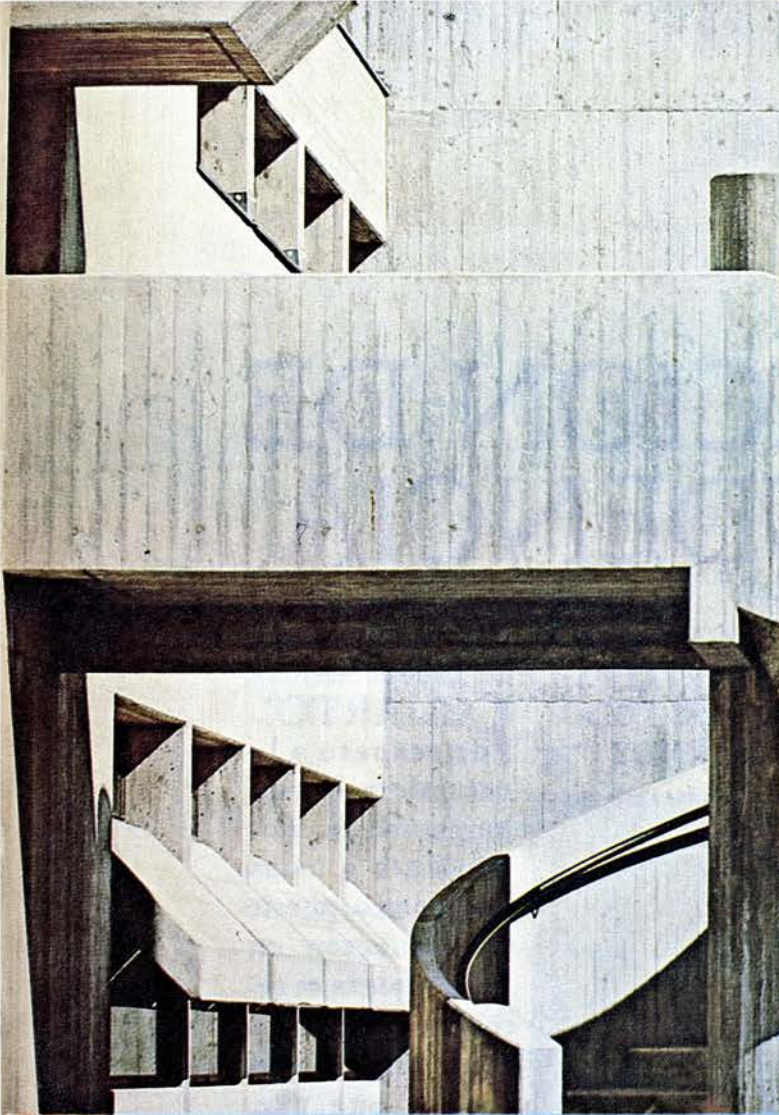
”Esto mismo quiso sentir Aristóteles cuando preguntó qué es la causa que el hombre es el más prudente de todos los animales. Y en otra parte torna a preguntar qué es la razón que el hombre es el más injusto de todos los animales; por donde da a entender lo mismo que dice Galeno: que la diferencia que hay del hombre al bruto animal, es la misma que se halla entre el hombre necio y el sabio, no más de por intensión. Ello cierto no hay que dudar sino que los brutos animales tiene memoria, imaginativa y otra potencia que parece el entendimiento, como la mona retrae al hombre; y que su ánima se aproveche de la compostura del cerebro, es cosa muy cierta. La cual, siendo buena y tal cual conviene, hace sus obras muy bien y con mucha prudencia; y si el cerebro está mal organizado, las yerra.

”Y así vemos que hay asnos, que los

son propiamente en el saber, y otros se hallan tan agudos y tan maliciosos, que pasan de su especie. Y entre los caballos se hallan muchas ruindades y virtudes, y unos más disciplinables que otros; todo lo cual acontece por tener bien o mal organizado el cerebro”.

Hasta la aparición de los índices de Quiroga, el *Examen* había tenido ocho ediciones en castellano, todas ellas de acuerdo con la original. Al exigir la Inquisición que se corrigieran los pasajes censurados, Huarte se dedicó en los últimos años de su vida a preparar una versión reformada. Aparte de suprimir párrafos sin importancia y también un capítulo completo, tuvo que reelaborar buena parte del libro, viéndose obligado a mantener en algunos puntos tesis opuestas a las que había defendido. Dicha versión fue publicada en la misma Baeza por su hijo Luis en 1594, cinco años después de la muerte del autor. Llena de erratas y de párrafos confusos, incluye también algunas novedades de interés, entre ellas, una exposición del concepto de “ingenio” y un estudio de “las diferencias que hay de hombres inhábiles para las ciencias”, en el que describe cuatro niveles de “inhabilidad” o falta de inteligencia. Esta versión reformada fue la que se reeditó en España durante los siglos xvii y xviii, mientras que las impresiones en castellano publicada en Leyden, Amsterdam y Amberes se hicieron de acuerdo con el texto original.

Hasta finales del siglo xviii, el *Examen* alcanzó, como hemos dicho, ochenta y dos ediciones en siete idiomas: castellano, alemán, francés, holandés, inglés, italiano y latín. Huarte tuvo numerosos seguidores en todos los países europeos y también imitadores como el italiano Antonio Zara (1615) y el español Esteban Pujasol (1637). Su obra no solamente ejerció una profunda influencia en el desarrollo de la psicología diferencial y la orientación profesional, sino que pesó asimismo en los estudios en torno al sistema nervioso, desde los publicados por médicos españoles de los siglos xvi y xvii, como Francisco Díez Vallarino, Andrés Velázquez, Pedro García Carrero y Juan Gutiérrez de Godoy, hasta los debidos a grandes figuras de la medicina europea de finales del siglo xviii y comienzos del xix, como Théophile de Bordeu, Franz Joseph Gall y François Joseph Victor Broussais. También influyó en destacadas personalidades de otros campos, entre ellos, Miguel de Cervantes, Alonso López Pinciano, Pierre Charron, Walter Raleigh y Gotthold Ephraim Lessing.



El hormigón ligero

Su limitado empleo por falta de información suficiente lo ha convertido en un material desaprovechado. Abordamos el estudio de sus propiedades comparándolas con las del hormigón normal

Domingo Pellicer

La preocupación por aligerar las estructuras es tan antigua como la propia arquitectura. El modo de conseguirlo se ha buscado siempre, y a la vez, por dos caminos: a través de formas estructurales consonantes con el comportamiento de los materiales que las componen y mediante la elección de materiales, estructurales o no, de la máxima ligereza posible.

En esta búsqueda, la generalización del empleo del hormigón armado y el acero como elementos estructurales ha supuesto un gran paso adelante. Ha permitido explotar la capacidad de trabajo a tracción y compresión en las secciones y ha posibilitado el empotramiento y consiguiente monolitismo. Gracias a todo ello se diseñan estructuras proporcionalmente ligeras para múltiples tipologías edificatorias.

El hormigón ligero es una nueva respuesta a la misma búsqueda. Se trata de un material en que se conjugan unas características mecánicas parecidas a las del hormigón armado, junto a una mayor ligereza propia. Lo acertado de la respuesta depende de la valoración de esa propiedad y de cuantas lo distinguen del hormigón tradicional; sin olvidar la incidencia del conjunto de tales características sobre la técnica y resultados finales de su empleo.

El actual hormigón ligero como material susceptible de ser armado y constituir elementos estructurales apareció a principios de siglo en los Estados Unidos en zonas caracterizadas por la carencia de áridos, aunque con materias que permitieron fabricar a partir de ellas áridos ligeros. La tecnología del hormigón ligero tardó en extenderse a

Europa y se hizo sin el énfasis originario. La situación comienza a cambiar.

Los áridos ligeros presentan la característica de que dan lugar a hormigones cuyo conglomerante adecuado es el cemento. Los que normalmente se emplean en la fabricación de morteros y hormigones ligeros se clasifican en dos grupos según su origen: naturales y artificiales. En general, los áridos ligeros naturales no son aptos para configurar hormigones con importante capacidad estructural; y sólo algunos artificiales sirven para tal finalidad. Entre los primeros se encuentran la lava volcánica, la perlita y la vermiculita.

Los áridos ligeros artificiales se obtienen a partir de un tratamiento a elevadas temperaturas de determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblanecen, con lo cual se hinchan. Por efecto de la temperatura la capa se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material ligero y duro, de superficie lisa y forma más o menos regular. Los más corrientes son las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

El árido de arcilla expandida está constituido por granos de forma redondeada, que presentan una superficie marrón-rojiza que envuelve una textura alveolar negruzca. Se obtienen por la cocción, en horno rotatorio, de una arcilla de características apropiadas, a una temperatura del orden de los 1000 grados Celsius.

La densidad aparente de estos áridos

oscila entre los 300 y 1000 kilogramos por metro cúbico. Su absorción varía según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y un 25 por ciento sobre el peso desecado en los áridos mayores, tras la inmersión forzada de 24 horas, y entre un 20 y un 40 por ciento en peso, en las mismas condiciones, para los áridos finos. Pueden dar lugar a una amplia gama de hormigones, de densidades inferiores a los 1850 kilogramos por metro cúbico y resistencias máximas cercanas a los 600 kilogramos por centímetro cuadrado. Sus coeficientes de conductibilidad térmica están comprendidos entre 0,3 y 0,75 kilocalorías por grado centígrado metro y hora.

El árido de pizarra expandida presenta similar configuración que el de arcilla expandida, pero su tono es más oscuro. El proceso de fabricación es parecido, aunque puede resultar algo más económico cuando proviene de yacimientos carboníferos, ya que su energía potencial calorífica permite disminuciones en los costes de cocción. El producto final es algo más pesado que las arcillas expandidas, lo que suele verse compensado por una resistencia algo mayor.

Los áridos de cenizas volantes calcinadas se obtienen a partir de dichas cenizas, que son un subproducto de la combustión del carbón. Están constituidas, en su mayor parte, por una materia vítrea en forma de esferillas huecas o macizas, de dimensión inferior a las 200 micras, por escoria de hulla y una pequeña cantidad de materia sin quemar. El árido ligero se fabrica a partir de las cenizas volantes por calcinación y, en determinados casos, por expansión. El primer sistema consiste en obtener la soldadura de las partículas, sometiénolas a una temperatura de 1200 grados Celsius. Da lugar a hormigones más pesados que los de arcilla o pizarra expandida; su resis-

1. EMPLEO DEL HORMIGON LIGERO en distintas estructuras y en puntos diferentes. Arriba, a la izquierda, aparece fotografiada la iglesia parroquial de Kehler (Alemania), cuyos muros y losas son de hormigón ligero visto; el árido utilizado fue arcilla expandida. A la derecha, un edificio comercial de Johannesburgo; el hormigón ligero se empleó en la realización de placas de techo suspendidas de un núcleo central. La fotografía inferior izquierda ilustra otro edificio comercial, sito en Chicago; en este caso se recurrió al hormigón ligero de esquisto expandido en la ejecución de los forjados curvos. Abajo, a la derecha, edificio de una empresa de Munich cuyos techos suspendidos son de hormigón ligero de arcilla expandida.



2. ARIDOS DE ARCILLA EXPANDIDA. El de la fotografía de la izquierda nos muestra las diferencias de textura entre núcleo y superficie sintetizada; el de la fotografía de la derecha comprende a la clase 3/8. Puede verse como, dentro de una clase granulométrica, las diferencias de diámetros no son grandes.

cia no supera los 450 kilogramos por centímetro cuadrado.

Los áridos ligeros con los que se vaya a confeccionar un hormigón susceptible de ser armado deben presentar determinadas características, que han sido recogidas en las normativas de todos los países en que se emplea ese material. Todas ellas, sin embargo, vienen a coincidir en los siguientes aspectos: forma redondeada y compacta, con la superficie cerrada, del grano de árido; inerte respecto a las armaduras y el cemento; volumen invariable ante los cambios de humedad y temperatura; resistente a los fenómenos climatológicos y los efectos del transporte; de calidad homogénea, y, por último, de la menor densidad posible.

En principio, los áridos ligeros que pueden cumplir estas condiciones son los de arcilla expandida, los de pizarra expandida y los de cenizas calcinadas o expandidas. Los dos primeros son los más utilizados en el continente europeo, mientras que el tercero se emplea en Gran Bretaña.

La forma más adecuada para los

áridos ligeros es la redondeada, sin ángulos ni cantos. Se favorece así la manipulación del hormigón, pues de lo contrario en las anfractuosidades de un árido irregular se introduciría una cantidad de mortero inútil para la mejora de plasticidad del hormigón. El árido ligero redondeado se adhiere perfectamente al mortero, siempre y cuando la dosificación de éste sea correcta, de tal modo que la rotura debe producirse por el árido.

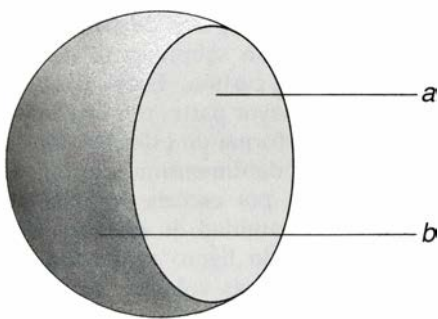
Las condiciones de superficie del árido influyen también en la manipulación del hormigón. No es recomendable una superficie totalmente lisa; tampoco es apropiado, para un hormigón ligero estructural, un árido ligero proveniente de trituración, pues se habría destruido la capa superior vitrificada, relativamente impermeable, aumentando de modo importante la porosidad abierta: ello daría lugar a mayores absorciones de agua y a mayor cantidad de mortero desperdiciado en los huecos, con el consiguiente aumento de densidad en el hormigón.

El tamaño de los granos influye en las propiedades de la mezcla y del hormigón final. Generalmente, el aumento de dimensión del grano lleva aparejado un descenso en su densidad, rigidez y resistencia. (Las normas internacionales aconsejan no sobrepasar los 25 milímetros en el tamaño máximo del árido.) Se utilizan diversas granulometrías, según los países, e incluso según las empresas fabricantes. Las clases granulométricas más corrientes son, para arenas ligeras, la 0/3, 0/4 y 0/5; para el resto, 3/7, 3/8, 3/10, 4/8, 8/16 y 10/20. Ambos números indican, respectivamente, los tamaños mínimo y máximo, en centímetros, de cada clase.

La proporción de árido ligero inferior al milímetro es muy pequeña en la mayoría de los procedimientos de ob-

tención. El árido fino se forma, sobre todo, por fricción o rotura de áridos mayores. Lo que significa que, en comparación, su densidad será mayor, así como su capacidad de absorción de agua. Por otro lado, los elementos nocivos que pudieran encontrarse en los áridos ligeros coinciden, en líneas generales, con los que lo son también para los áridos normales. Hay que adoptar precauciones especiales cuando los áridos ligeros presenten finos. (Por finos se entiende el grupo de partículas de dimensión igual o inferior a 0,008 centímetros.) Las diversas normativas limitan al 3 por ciento el valor máximo de los finos de las clases granulométricas inferiores y al 2 por ciento en las superiores. Esta limitación se debe a que los finos se adhieren a los granos, entorpeciendo la adherencia de éstos con el mortero.

¿Qué decir de las características del hormigón ligero fresco? Las posibilidades de dosificación del hormigón ligero son mayores que las del hormigón normal, puesto que se introduce una nueva variable en el producto final: la densidad. La variación de densidad se consigue modificando la proporción de componentes. Las características mecánicas de los áridos varían de un tipo a otro. Este factor, que se da también en los áridos normales, tiene en el caso de los hormigones ligeros una incidencia muy superior que en aquéllos. En el hormigón normal se procura que la única resistencia sea la del árido; el mortero debe constituir sólo el elemento de transmisión de las tensiones, de árido a árido. En el hormigón ligero, por contra, el árido es débil, lo que implica una menor cooperación a la transmisión de esfuerzos, limitándose su actuación a aligerar el peso. De este modo, el agente principal



3. MORFOLOGIA DEL ARIDO DE ARCILLA, constituido por granos redondeados que presentan una superficie marrón-rojiza que envuelve una textura alveolar negruzca. Se obtienen por la cocción, en horno rotatorio, de una arcilla de características apropiadas a una temperatura de unos 1000° C.

de transmisión de esfuerzos pasa a ser el mortero. En este sentido, interesa que el árido posea una forma esférica, la más eficaz para que los esfuerzos se transmitan de modo adecuado por el mortero.

Puede suponerse que el paso de una categoría de cemento a la inmediatamente superior proporcionará al hormigón ligero un aumento de resistencia, a los 28 días, de un 10 por ciento. Sin embargo, ensayos realizados por el autor permiten afirmar que, a medida que el hormigón envejece, dicha diferencia disminuye, contra lo que cabría esperar. De todos modos esa mejora tiene interés, puesto que los cálculos de piezas de hormigón se hacen justamente en razón de la resistencia característica a los 28 días; un aumento de ésta comporta mayor seguridad.

No parece conveniente variar el tipo de cemento para reducir la cantidad de éste en la dosificación, y así la densidad. Cualquier disminución de ésta entraña un aumento de aire ocluido que, a fin de cuentas, contribuiría a la reducción de sección de la pieza y, en definitiva, a una disminución no previsible de su resistencia.

Manteniendo la proporción de la mezcla, un cambio en la categoría del cemento no modifica la densidad aparente del hormigón. Las recomendaciones internacionales indican un contenido mínimo en cemento de 300 kilogramos por metro cúbico de hormigón para hormigones ligeros armados, como garantía de protección contra la corrosión y buena adherencia de la armadura. La docilidad en el hormigón fresco suele ser deficiente para dosificaciones inferiores de cemento.

Resulta antieconómico en casi todos los casos superar una dosificación de 400 kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón, cantidad a partir de la cual empiezan a presentarse los problemas de la sobredosificación, ya conocidos en el hormigón normal: aumento de retracciones, térmicas e hidráulicas, con el consiguiente riesgo de agrietamiento. Por otro lado, el cemento es el material más pesado de cuantos entran en la dosificación y coopera al aumento de densidad del conjunto.

Hemos hablado de la dosificación del hormigón y de la dosificación del cemento. Abordemos la dosificación del agua. Parte del agua que se emplea en la preparación de un hormigón ligero tiene por objeto provocar la hidratación del cemento y favorecer la movilidad de la masa. Nos referimos a la



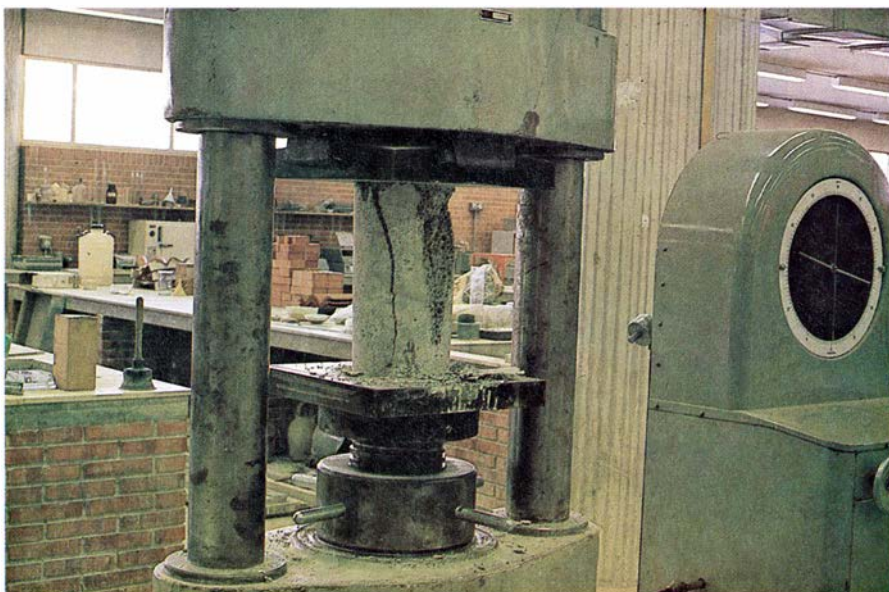
4. **ARIDO DE ESQUISTO EXPANDIDO** en muestras de diferentes clases granulométricas. Destaca el tamaño notable de los granos de la clase "arena" y la forma notablemente irregular de todos los áridos.

llamada agua eficaz. Otra parte será absorbida por el árido, puesto que éste es, en mayor o menor grado, poroso. El agua eficaz se comporta, en el hormigón ligero, de modo similar al agua con que se confecciona un hormigón normal; por tanto ejerce un influjo análogo en la resistencia y docilidad del material. Su cantidad depende principalmente del diámetro máximo de los granos, de la composición granulométrica del árido, de la forma y condiciones de superficie de éste, así como de la cantidad de cemento.

La cantidad de agua de absorción del árido depende, como ya se ha visto, de las características de porosidad, forma y estado de superficie del grano; es fun-

ción, también, de su contenido de humedad en el momento de empleo, de la viscosidad de la pasta y del tiempo que dure el amasado y vertido. La determinación aproximada suele hacerse midiendo el volumen de agua absorbido por el árido durante los 30 primeros minutos de inmersión.

El carácter del hormigón ligero está muy ligado a su porosidad, es decir, a la relación entre el espacio no ocupado por la parte sólida y el volumen total. En el hormigón normal, esta relación viene a coincidir con la relación agua-cemento. El influjo de los poros de compactación, sin excesiva importancia, se cifra en un 3-4 por



5. **ENSAYO DE COMPRESION** de una probeta de hormigón ligero. La rotura se produce por esfuerzo cortante y de modo explosivo; denota ello la mayor fragilidad del hormigón ligero frente al normal.

ciento del volumen del hormigón (de 30 a 40 litros por metro cúbico).

La relación agua-cemento, adoptada con el mismo criterio con que se emplea en el hormigón normal, no presenta gran interés en el hormigón ligero. Habría que descontar, en efecto, el agua absorbida por los áridos, cuya determinación en obra sería engorrosa, y el contenido de los poros de compactación es muy variable. Hemos determinado dicho contenido para hormigones ligeros con áridos de arcilla expandida, comprobando que depende de la densidad final alcanzada, y que es propio de cada tipo de áridos, salvo cuando el espacio residual es similar al del hormigón normal.

El espacio residual suele ponerse en relación con el contenido de cemento. Existe cierta dependencia entre la relación espacio residual-cemento y la resistencia a compresión, lo que permite proyectar nuevas mezclas y plantear un método estimativo con el que prever sus posibles resistencias, con alguna precisión, aunque no tanta como para el hormigón normal.

Los principios relativos a la dosifi-

cación aplicables a los áridos para hormigones normales son válidos también para el hormigón ligero, si tenemos en cuenta ciertas cautelas. En primer lugar, el aumento de tamaño de estos áridos suele llevar aparejada una disminución del módulo de elasticidad, resistencia de los granos y densidad. Por ello, y a diferencia del hormigón normal, resulta conveniente que el diámetro máximo de los granos no sea grande. La utilización de áridos de ocho milímetros de tamaño máximo en una composición conllevaría un aumento de resistencia de un 10 por ciento sobre otra cuyo árido partiera de 16 milímetros, y un aumento de densidad proporcional de unos 100 kilogramos por metro cúbico de hormigón, es decir, entre un 6 y un 7 por ciento.

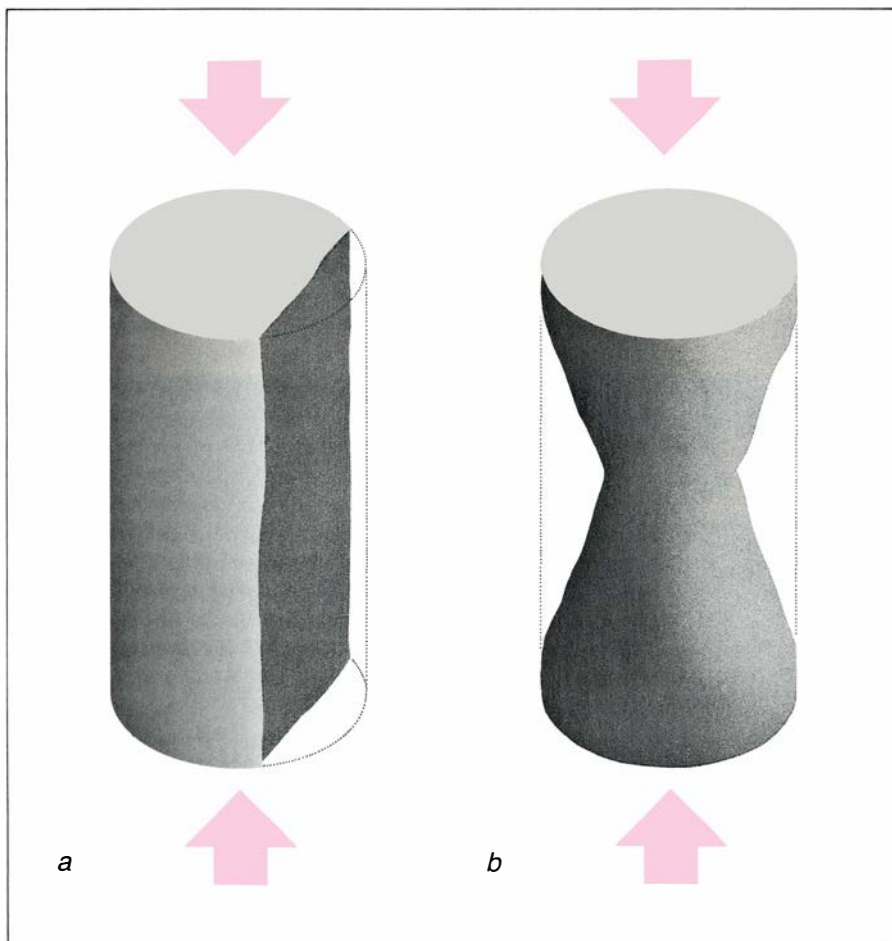
En segundo lugar, al disminuir el tamaño del grano aumentará la superficie específica que ha de ser bañada por el mortero. Por ello habrá que aumentar el volumen de éste y, en consecuencia, el número de partículas finas. Vimos ya que la mayoría de las arenas ligeras presentan sólo una es-

casa proporción de granos enteros menores de 1 milímetro, y que hay que contar con una imprevisible cantidad de finos provenientes de la fricción o destrucción de áridos. Para que el mortero sea el adecuado, y fluya en los intersticios dejados por los áridos gruesos, conviene sustituir total o parcialmente las arenas ligeras por una arena natural de granulometría apropiada. Con ello aumenta, no se olvide, la densidad final del hormigón y también la diferencia de densidad ente el mortero y el árido ligero grueso, de modo que éste puede tender a flotar.

En tercer lugar, conviene trabajar en el hormigón ligero con mezclas más ricas en mortero que en un hormigón normal de similar categoría para obtener una compactación óptima, un buen recubrimiento de armaduras y un buen acabado superficial. Dentro de una correcta granulometría, la parte que constituye el mortero, es decir, cemento, árido fino, agua eficaz y oclusiones de aire, debe estar comprendida entre 500 y 550 litros por metro cúbico. Un bajo contenido de mortero dificultará la compactación y presentará exceso de oclusiones de aire, con disminución de densidad y de resistencia. Un exceso de mortero provocará, por contra, un innecesario aumento de densidad que ni siquiera se verá compensado con un incremento significativo de la resistencia. El hormigón ligero, muy sensible a las variaciones de composición granulométrica, exige mantener siempre la misma. Para ello es necesario una dosificación separada, por grupos granulométricos escalonados. Si en la composición se emplea arena natural es irrelevante que la granulometría de ésta sea continua o discontinua. Sin embargo, también para ella debe contar el principio de regularidad de dosificación.

Los dos aspectos de la mezcla de hormigón ligero que resultan decisivos para la calidad final del producto son el contenido de agua de los áridos en el momento del amasado y el menor peso de los granos de árido con relación al mortero. Estos dos factores condicionan el amasado de suerte tal que se impone una técnica distinta de la del hormigón normal para su realización y puesta en obra. ¿Cuál?

Como ya se ha dicho, el grado de humedad de los áridos ligeros incide de un modo determinante sobre ciertas propiedades del hormigón ligero, antes y después del fraguado. Si se emplea el árido seco, la absorción de agua en razón de su porosidad puede causar que la masa pierda docilidad durante la



6. ROTURA DE LAS PROBETAS en el hormigón normal y en el hormigón ligero. El comportamiento de este último es el de un material frágil. En el hormigón normal el efecto de zunchado de los platos de la prensa da lugar a dos conos, con destrucción de la zona media por aumento de su diámetro debido a tracción radial; en el hormigón ligero produce una rotura perpendicular a los platos por cortadura a través del árido.

operación de mezclado y, posteriormente, durante el tiempo que tarde su puesta en obra y compactación. Esta pérdida de docilidad cobra especial importancia si se va a emplear hormigón fabricado en central hormigonera para su transporte posterior.

Pero si el árido ligero está excesivamente humidificado no surgen problemas de docilidad; ahora bien, como cede el agua absorbida con gran lentitud y nunca totalmente, asistiremos a un aumento de densidad y de conductibilidad térmica al verse reemplazado el aire de los poros por agua. Dicha humedad trae consigo diferencias de tensiones de retracción entre las zonas interiores de la pieza hormigonada y las zonas superficiales; éstas, más expuestas al aire en movimiento, tardan menos en secar y sobreviene el agrietamiento.

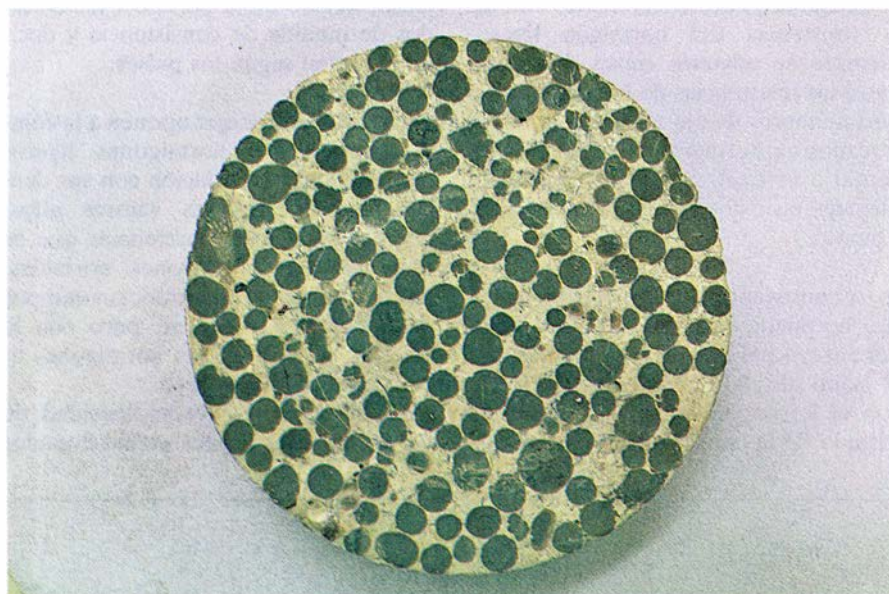
Conviene, pues, utilizar el árido seco y, mediante algún procedimiento idóneo de humidificación, garantizar un contenido de agua uniforme y medible. De este modo se encarece algo la producción del hormigón ligero, ya que deben adoptarse sistemas de almacenamiento del stock de áridos que tiendan a evitar que éste se humedezca. Por supuesto, estos sistemas son necesarios allí donde deba almacenarse el árido en espera de ser utilizado, en la planta de fabricación, durante el transporte o en obra.

Pueden emplearse diversos métodos para el premojado de los áridos. Uno de ellos consiste en regar periódicamente el stock desde unas cuatro horas antes del empleo, dejando algún sistema para la evacuación del agua, como rampas perforadas o una base drenante de arena. Tiene el inconveniente de que no se consigue uniformidad de humidificación en los áridos. El método más corriente es el de premojar en la hormigonera, en cuyo caso sí sabemos aquí la cantidad de agua que se empleará. El inconveniente de este método estriba en que, al introducir una nueva operación en la hormigonera, se rebaja su rendimiento, puesto que el proceso total de mezclado requiere más tiempo.

A semejanza de lo que ocurre en el hormigón normal, el cemento debe dosificarse en peso. Los áridos ligeros pueden dosificarse en peso o en volumen. En el primero de los casos, es necesario conocer previamente el contenido de agua ya que pueden modificar de modo importante la densidad del árido almacenado. Es preferible la dosificación ponderal cuando se hayan cuidado las condiciones de almacenaje



7. RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION sobre distintos hormigones jóvenes. A la izquierda se ofrece un hormigón ligero de 1050 kilogramos por metro cúbico; en el centro, hormigón ligero de 1800 kilogramos por metro cúbico; a la derecha, hormigón normal con árido calizo obtenido por machaqueo.



8. SECCION DE UNA PROBETA DE HORMIGON LIGERO con árido de diámetro máximo de 16 milímetros. Con una correcta dosificación del mortero, en el que se ha empleado arena natural, el arropamiento del árido es excelente. Se aprecia con nitidez la estructura porosa del núcleo del árido de arcilla expandida.

del árido y la mezcla se vaya a realizar en centrales hormigoneras o, en general, con garantías de control.

La dosificación en volumen es aconsejable para los áridos ligeros de mayor tamaño, cuando no se den las condiciones antes expuestas. Para las clases granulométricas inferiores a cuatro milímetros es mejor la dosificación en peso, pues el agua —además de aumentar de forma imprevisible en la mezcla— produce un efecto de esponjamiento en la arena ligera, con aumento de volumen.

Por lo que al mezclado de componentes se refiere, las hormigoneras de eje inclinado favorecen la formación de

grumos de mortero pegados a las paredes, que, en el caso del hormigón normal, son arrastrados por la caída del árido. Sin embargo, esto no sucede con el árido ligero, cuyo peso es considerablemente menor y cuya forma suele ser regular. La formación de grumos es más acentuada en mezclas con baja relación agua-cemento y mucho cemento, que es lo que se precisa para obtener buenas calidades de hormigón ligero. Puede contrarrestarse este inconveniente añadiendo desde el principio toda el agua de amasado. Así, el árido aumenta de peso y el cemento tiende a rodear los granos, con lo que éstos pesan lo suficiente como para

desprender los grumos de las paredes de la hormigonera. Conviene emplear hormigoneras forzadas, de eje vertical u horizontal, para aprovechar el conglomerante.

El orden a seguir bien pudiera ser éste: se introducen los áridos en la hormigonera en marcha; luego se vierten unas 2/3 partes del agua del amasado necesaria, mezclando durante unos 30 segundos. Se echa después el cemento y el agua restantes, para seguir mezclando durante minuto y medio. Si se empleasen aditivos en polvo, se mezclan, en seco, al cemento; si líquidos, se añaden al agua de amasado, pero una vez que haya tenido lugar el premojado del árido, porque de lo contrario podrían ser absorbidos con pérdida de efectividad. Los tiempos de mezclado son superiores a los del hormigón normal y oscilan entre el minuto y medio y los tres minutos. Un exceso prudencial de tiempo de mezclado mejora la docilidad y, ocasionalmente, afianza la resistencia del hormigón ligero. Siempre se advierte cierta diferencia entre las resistencias de hormigones en hormigoneras de eje inclinado y los fabricados en hormigoneras de eje horizontal o vertical. Los resultados serán mejores en estos dos casos que en el primero.

La consistencia del hormigón ligero no puede determinarse por medio del ensayo del descenso de la masa en el cono de Abrams, como se hace con el hormigón normal. En éste, la medida de la consistencia viene deter-

minada casi exclusivamente por la relación agua-cemento. Se dispone de una aceptable gama de valores suficientemente corroborados por la práctica, que proporcionan índices válidos de docilidad y calidad del hormigón.

En el hormigón ligero fresco, consistencia y docilidad no siempre son magnitudes correlativas. Pueden obtenerse resultados aceptables, si se manejan masas de consistencia plástica o blanda, con el método del cono de Abrams; mas para masas secas, a un descenso nulo puede corresponder una docilidad bastante buena. De hecho, existen dos tendencias de fabricación: la americana, que se sirve de masas blandas, con exceso de agua y cemento, y la europea, en la que se tiende al empleo de masas bastante secas, con una relación agua eficaz/cemento muy ajustada y menores dosis de cemento. Hoy no son homologables los resultados de ambas tendencias; incluso, dentro de la europea, los métodos de medida de consistencia y docilidad varían según los países.

Las resistencias que oponen a la compresión los hormigones ligeros guardan estrecha relación con sus densidades. Se alcanzan valores altos, equiparables a las resistencias que se obtienen con hormigones normales, por lo que, en este sentido, sus campos de aplicación coinciden, pero con la ventaja, a favor de los hormigones ligeros, de su menor peso.

La relación resistencia-densidad de los hormigones ligeros confeccionados

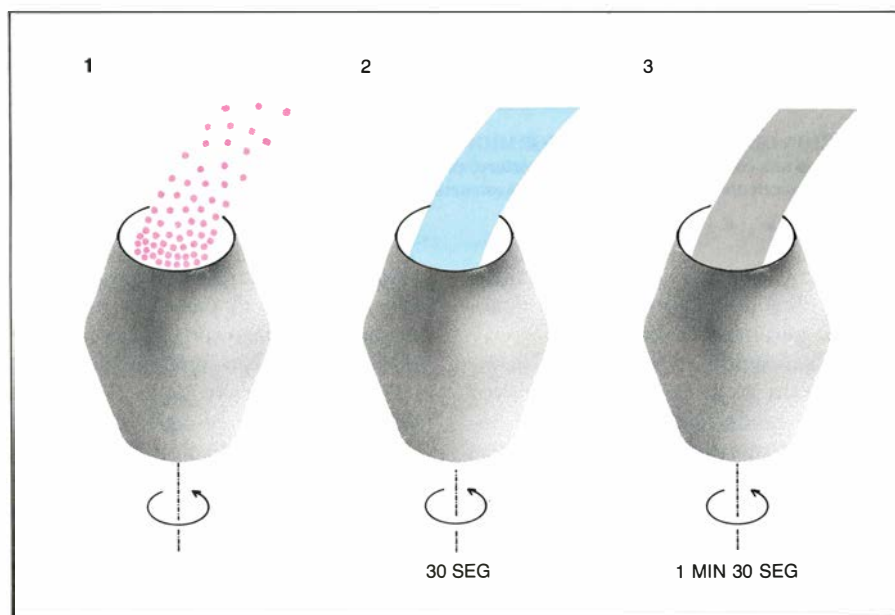
con un determinado tipo de árido puede representarse mediante una curva sigmoide cuya rama ascendente indica que la resistencia aumenta rápidamente en razón directa a la densidad; llegadas ambas a un punto, que puede considerarse el de óptimo rendimiento, el aumento de resistencia se va haciendo progresivamente menor, hasta que ya no crece, aunque aumente la densidad.

La disminución de la densidad del hormigón ligero suele llevar aparejada consigo un aumento de la cantidad de aire encerrado en la masa de hormigón. Dicho aumento del índice de huecos lo explica la progresiva pérdida de la corrección de la granulometría de toda la fase seca del hormigón. En efecto, el volumen de áridos ligeros crece en comparación con el de arena y cemento que debería arroparlos, hasta que este último resulta ya insuficiente. Se trata, en última instancia, de una progresiva falta de compacidad en el hormigón, que repercute negativamente en su resistencia y favorablemente sobre su conductibilidad térmica, que disminuye.

En hormigones estructurales parece necesario mantener una proporción de aire oculto por debajo de los 80 litros por metro cúbico para garantizar la resistencia adecuada y la protección de las armaduras frente a la corrosión. (Un hormigón normal de buena compacidad presenta de 30 a 40 litros por metro cúbico.)

La deformabilidad de un hormigón ligero es función de la de los elementos que lo componen: el mortero y los áridos. La diferencia de comportamiento con el hormigón normal es grande. En éste, los áridos son normalmente más rígidos que la pasta; por ello, cuando se halla bajo carga, las tensiones se concentran en los áridos, que no están en contacto, y así la transmisión de cargas de uno a otro se realiza a través de una capa de mortero que recibe una carga adicional grande que, en teoría, podría hacerle entrar en período plástico. En el hormigón ligero, por el contrario, los áridos son menos rígidos que la pasta del mortero, por lo que éste deberá soportar la carga inicial, pero no la carga adicional.

De todo ello se derivan algunas conclusiones. El mortero debe ser más resistente en el hormigón ligero que en el normal, porque es el que transmitirá las cargas. En el hormigón normal, el mortero goza de un margen de trabajo más amplio porque, aunque llegase a tornarse plástico, no se rompe y ni siquiera se deforma fácilmente: los pro-



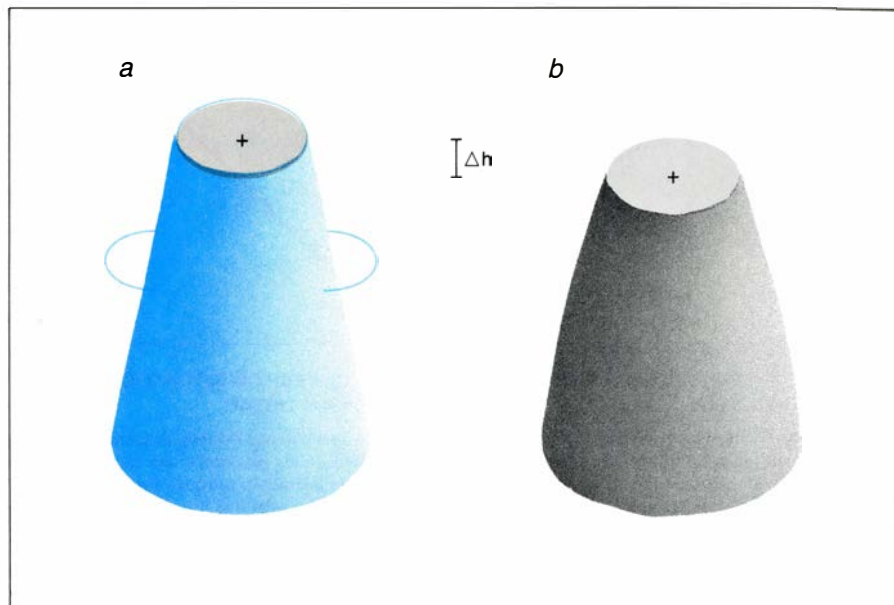
9. CONVIENE EMPLEAR HORMIGONERAS FORZADAS, de eje vertical u horizontal, para garantizar el arropado del árido ligero. El orden a seguir se esquematiza en la ilustración: se introducen los áridos en la hormigonera en marcha; luego se vierten unas dos terceras partes del agua de amasado, mezclando durante unos 30 segundos. Se echa después el cemento y el agua restantes, para seguir mezclando. Si se emplean aditivos en polvo, se mezclan, en seco, con el cemento; si se utilizan líquidos, se añaden al agua de amasado.

pios áridos se lo impiden. Ello significa que el módulo de elasticidad del hormigón ligero depende en mayor medida de los áridos que el del hormigón normal. Y depende también de la proporción relativa entre mortero y árido, como puede deducirse de lo expuesto anteriormente sobre el aire ocluido.

Para una calidad constante de mortero, el módulo de elasticidad del hormigón ligero aumenta linealmente al hacerlo el contenido de mortero (un 12 por ciento para un aumento de 0,1 metros cúbicos cada metro cúbico). En el hormigón normal disminuye linealmente al aumentar el contenido de mortero (un 7 por ciento cada 0,1 metros cúbicos por cada metro cúbico). La resistencia, en el hormigón ligero, aumenta, pues, con el contenido de mortero y la calidad del mismo; en el hormigón normal aumenta con la calidad, pero no con el contenido. Debido a lo cual y a la gama de resistencias de los tipos de áridos, en el hormigón ligero hay una variedad mayor de sus módulos de elasticidad que en el hormigón normal. Sin embargo, al comparar hormigones ligeros de igual resistencia, fabricados con áridos de distinta rigidez, puede comprobarse que los módulos de elasticidad no se diferencian demasiado entre sí: prueba de la importancia secundaria de la resistencia del árido.

El conocido diagrama tensión-deformación del hormigón normal presenta una primera rama casi recta, denominada “período elástico”, en la que puede considerarse que la tangente coincide con la curva, o lo que es lo mismo, el módulo de elasticidad permanece constante. La segunda rama del diagrama es el “período plástico”: la pendiente de la curva va disminuyendo progresivamente y, con ella, el módulo de elasticidad. Finalmente, el hormigón tiende a deformarse sin aumento de carga hasta la rotura o con disminución de carga hasta la rotura. La deformación final a compresión es del orden de 3,5 milímetros por metro y, a tracción, de 0,5 milímetros por metro. En este caso, el árido es más rígido que el mortero, por lo que, al entrar en carga, se forman rótulas de mortero entre los granos. Las tensiones se vacían, por así decirlo, de uno a otro grano a través de aquél. De este modo, el material presenta una gran pseudoplasticidad, acompañada de microfisuras más o menos importantes.

Si la rigidez del árido es menor que la del mortero –cosa que sucede en el hormigón ligero– ya no es posible la formación de rótulas y, al finalizar el período elástico, sobreviene casi direc-



10. CONO DE ABRAMS para medir la consistencia del hormigón normal. Se emplea un molde sin fondo de forma troncocónica, provisto de dos asas que faciliten su manipulación. Se coloca el molde sobre una superficie plana, rígida, que no absorba agua. Se introduce cuidadosamente el hormigón, se enrasa la superficie y se desmolda levantando el molde en dirección vertical. Se mide el asiento por referencia a una regla horizontal colocada sobre el cono. Con este método, la consistencia corresponde razonablemente a la docilidad debida a la relación agua-cemento. Ambos factores no siempre son correlativos en el hormigón ligero.

tamente la ruptura, de modo brusco. El comportamiento del hormigón ligero es el de un material frágil. La rotura de las probetas, en este caso, es explosiva. También es distinta la forma de rotura: la forma característica de la probeta cilíndrica de hormigón normal, en la que el efecto de zunchado de los platos de la prensa da lugar a dos conos, con destrucción de la zona media por tracción radial debida a su aumento de diámetro, cede paso en la probeta cilíndrica del hormigón ligero a una rotura en un plano casi perpendicular a los platos, por cortadura a través del árido.

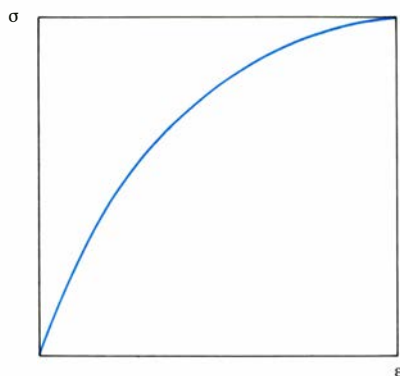
Como ya se ha dicho, con los hormigones ligeros pueden alcanzarse cotas de resistencia similares a las obtenidas con hormigones normales. Pero a la hora de dosificarlos hay que conjugar también el factor densidad, específico de los ligeros. Los criterios de dosificación son parecidos a los de los hormigones normales, pero presentan algunas particularidades que conviene conocer. Así, son utilizables los mismos cementos que para cualquier otro tipo de hormigón. Las dosificaciones pueden ser ligeramente más altas, en vista de que es necesario obtener una calidad superior en el mortero que arropará a los áridos. Los límites de empleo del cemento son 250 kilogramos por metro cúbico y 400 kilogramos por metro cúbico. Conocidos ya los tipos más frecuentes a emplear, cabe indicar que resulta mejor usar la dosificación ponderal. En general, debe

prescindirse de la arena ligera para la confección de hormigones estructurales: su resistencia similar a la del árido no permitirá obtener un buen mortero de arropamiento; su absorción de agua podría modificar la manipulación del hormigón. Puede sustituirse por arena normal de granulometría continua, no obstante aumentar la densidad del hormigón.

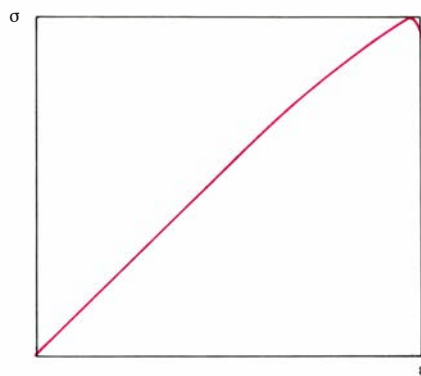
Es necesario prever la absorción de parte del agua por el árido ligero. Las arcillas expandidas absorben un 15 por ciento de su peso en agua, durante las operaciones de mezclado, que no servirá para hidratar el cemento en primera instancia. La dosificación del agua –además de ese 15 por ciento en peso del árido– no debe superar el 50 por ciento del peso del cemento. La consistencia de la masa, que tendería a seca y dificultaría las operaciones de puesta en obra, permitirá, por contra, obtener un mortero de arropamiento más resistente.

Como es natural, no se puede dosificar el aire ocluido. Sin embargo, conviene estudiar la granulometría del conjunto de la fase seca, a fin de conseguir la máxima compacidad posible para cada densidad, sabiendo que un volumen de aire superior a los 80 litros por metro cúbico puede afectar a la calidad final del hormigón armado.

Los hormigones ligeros estructurales presentan otras ventajas notables. Pueden aunar el carácter portante propio de un elemento estructural con una



GRAFICA TENSION-DEFORMACION
HORMIGON NORMAL



GRAFICA TENSION-DEFORMACION
HORMIGON LIGERO

11. DIAGRAMAS TENSION-DEFORMACION en el hormigón ligero y en el hormigón normal. La deformabilidad de un hormigón ligero es función de la deformabilidad de los elementos que lo componen: el mortero y los áridos. Su comportamiento difiere del seguido por el hormigón normal. En éste, los áridos suelen ser más rígidos que la pasta del mortero; y menos rígidos en el hormigón ligero. Por consiguiente: el mortero será más resistente en el hormigón ligero que en el normal, porque es quien transmitirá las cargas y, en consecuencia, el módulo de elasticidad del hormigón ligero depende en mayor medida de los áridos que el del hormigón normal. La resistencia en el hormigón ligero aumenta con el contenido y la calidad del mortero, mientras que en el hormigón normal aumenta con su calidad, pero disminuye con su exceso.

conductibilidad térmica más baja. Este supuesto es particularmente aprovechable en elementos prefabricados. El empleo de hormigón en la realización de elementos lineales suele venir desaconsejado por las dificultades de confección del material "in situ" y por la mayor complejidad de su puesta en obra. Pero es práctica corriente en algunos países en que las circunstancias minimizan tales inconvenientes. Vale, pues, la pena detenerse en su conductibilidad.

El comportamiento al paso del calor es más favorable en el hormigón ligero que en el hormigón normal. Los problemas de puentes térmicos en los elementos lineales de hormigón normal no provienen tanto de las pérdidas de calor cuanto de los desperfectos debidos a las condensaciones a que pueda haber lugar. Estas tienden a acentuarse en aquellas zonas donde las diferencias de

conductibilidad térmica con los materiales adyacentes son relativamente elevadas, como es el caso de la construcción tradicional de entramado de hormigón y cerramientos de ladrillo y aislante.

Cuando los elementos estructurales son de hormigón ligero armado, su coeficiente tiende a aproximarse en cuantía al del muro aislado, y las condensaciones, de producirse, lo hacen uniformemente en el conjunto, reduciendo así la posibilidad de manifestación patológica. Los valores de la conductibilidad térmica de los hormigones ligeros varían en función del tipo de árido empleado, de la densidad del hormigón y de su grado de humedad. Para un estado higrométrico de equilibrio con el ambiente y áridos de arcilla expandida, dichos valores oscilan entre 0,5 y 0,8 kilocalorías por grado, metro

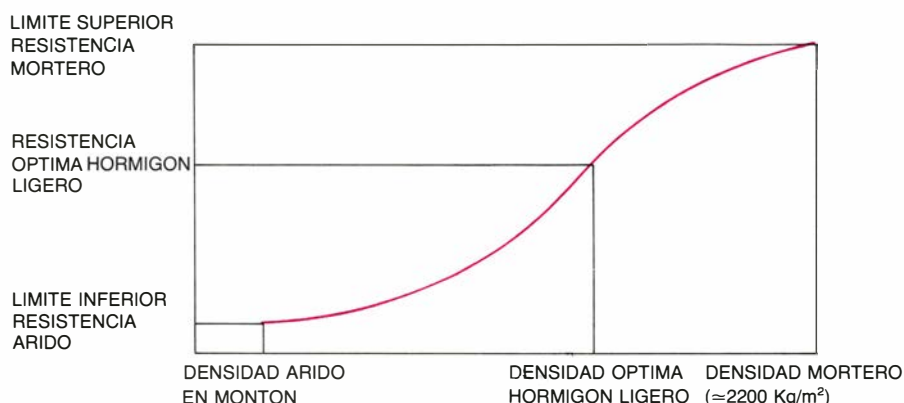
y hora con densidades del hormigón de 1300 a 1700 kilos por metro cúbico.

El comportamiento ante incendios del hormigón ligero es mucho más favorable que el del hormigón normal: su conductibilidad térmica es menor. Por tanto, a igualdad de temperatura exterior con el hormigón normal, el calentamiento de las armaduras será más lento. Como, por otra parte, su coeficiente de dilatación crece mucho menos con el aumento de temperatura que el del hormigón normal, y generalmente su módulo de elasticidad es también más bajo, las tensiones térmicas serán menores, disminuyendo el peligro de grietas y desconchados. Hemos de indicar, sin embargo, que este mejor comportamiento del hormigón ligero frente al calor puede sufrir un fuerte detrimento si está demasiado húmedo. Con un contenido de humedad superior al 10 por ciento en volumen de poros, el hormigón sufre una merma en su resistencia al paso del calor. Se puede producir además una sobrepresión del vapor de agua al calentarse, pues su lenta evacuación produciría roturas por explosión. (De todas formas, tal contenido de humedad sólo puede darse a causa de unas circunstancias de fabricación y estado general del hormigón ligero verdaderamente pésimas.)

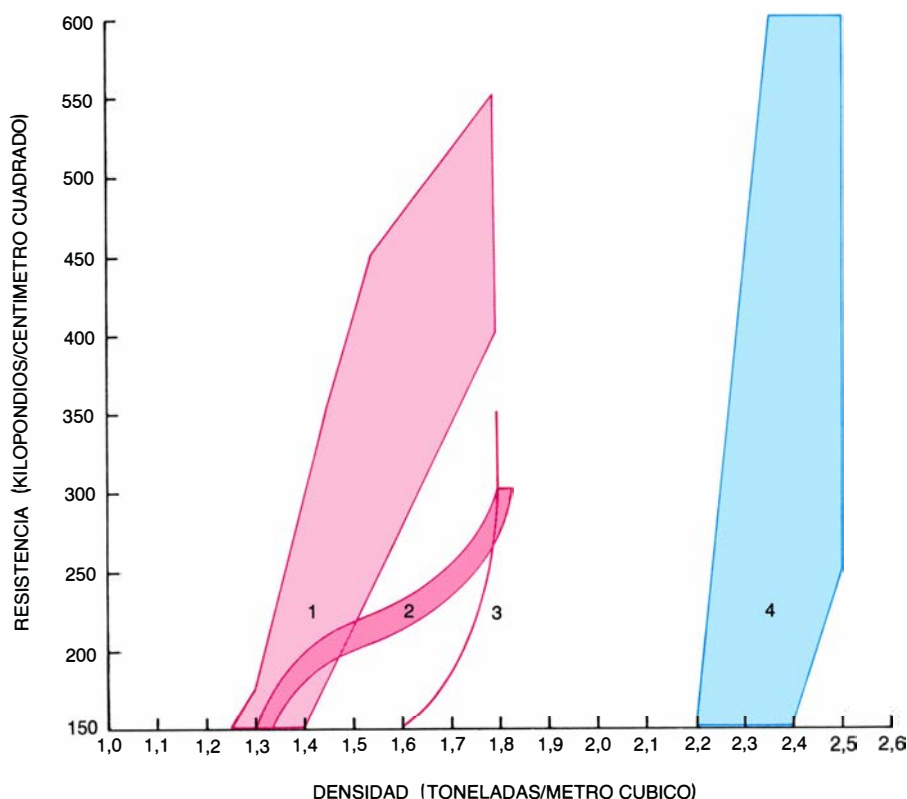
El espesor de una placa de hormigón ligero puede ser un 20 por ciento inferior al de una placa de hormigón normal para una misma duración de resistencia al fuego. Además, por motivos mecánicos, los espesores de hormigón ligero resultan mayores que los de hormigón normal, así como también los recubrimientos. De lo que cabe concluir que un hormigón ligero estructural, sometido a las mismas circunstancias de proyecto que otro normal, presentará un comportamiento al fuego mucho más favorable.

Si se supone que la mezcla de hormigón puede estar unas tres horas, como máximo, en transporte, antes de que fragüe, la máxima absorción de agua por parte del árido, que podría afectar a la docilidad, sería la correspondiente a la admitida por aquél al cabo de ese tiempo, en inmersión total. En el caso de los áridos ligeros fabricados en España esa absorción es del orden del 7,5 por ciento en peso.

Si el árido empleado fuese fuertemente absorbente habría que añadir agua a pie de obra hasta alcanzar la consistencia deseada. Esta medida no va a influir sobre la resistencia, puesto que la relación agua eficaz/cemento no varía; si, por el contrario, no se añadiese agua, es posible que disminuyese



12. RELACION RESISTENCIA-DENSIDAD de los hormigones ligeros. Con éstos se alcanzan elevadas resistencias equiparables a las que se obtienen con hormigones normales, si bien aquéllos ofrecen una ventaja: su menor peso. La relación resistencia-densidad sigue una curva sigmoide cuya rama ascendente indica un rápido crecimiento en relación directa con la densidad; llegadas ambas al punto de óptimo rendimiento, el aumento de resistencia va haciéndose menor hasta que no aumenta ya más aunque lo haga la densidad.



13. RELACION ENTRE DENSIDADES Y RESISTENCIAS de los hormigones estructurales. Los símbolos de la ilustración corresponden a los siguientes significados: 1, campo de hormigones ligeros internacionalmente empleados; 2, campo de hormigones ligeros con los áridos que hoy se emplean en España; 3, valores límites de empleo para hormigones ligeros en los Estados Unidos, y 4, campo de hormigones normales.

la resistencia, pues el hormigón se habría vuelto excesivamente seco y ofrecería dificultades de compactación.

El camión hormigonera puede llevar una cuba basculante sin elementos agitadores, que tiene por misión mantener la homogeneidad del hormigón, o una cuba rotatoria amasadora, con elementos agitadores, que tiene por misión la mezcla en transporte de los componentes del hormigón. Esta cuba rotatoria suele ser del tipo de hormigonera de caída libre que, como se ha dicho, da peores resultados que la hormigonera forzada de eje vertical. Por ello, es previsible cierta segregación durante el transporte.

La compactación del hormigón ligero es un importante aspecto de su puesta en obra. Debe realizarse siempre por vibrado, con frecuencias de vibración dobles o triples de las usadas en hormigones normales, introduciendo el vibrador a distancias más cortas y durante menos tiempo que en aquél; hay que evitar, asimismo, la flotación del árido.

A causa del agua acumulada en el interior del árido, la diferencia en los contenidos de humedad, entre las zonas internas y externas del hormigón, es mayor en el hormigón ligero

que en el normal; por lo que las tensiones de retracción serán mayores, así como las correspondientes fisuraciones. Para evitarlo, se mantiene la humedad de amasado o se propicia una humidificación adicional. Así, se protegerán las superficies mediante tejidos húmedos o regándolas con agua; hay que resguardarlas del viento, mediante láminas de plástico o por medio de una película de curado. Suele ser suficiente, en general, un tratamiento de siete días si las temperaturas son superiores a 10 grados Celsius. Es conveniente mantener el encofrado puesto durante un cierto tiempo, en especial si los días son secos y ventosos.

El hormigón ligero, a igualdad de dosificación de cemento, se calienta más que el normal con el calor que se desprende en la hidratación, como consecuencia de su menor masa. Normalmente, además, este aspecto se ve incrementado por ser más altas las dosificaciones de cemento en la mayoría de los casos. El calor producido por la hidratación fluye más lentamente, debido a la menor conductibilidad térmica del hormigón ligero. Por añadidura, la elevación interna de temperatura favorece los fenómenos de hidratación, acelerando la producción de calor en menos tiempo.

Macroestructuras del universo

Los cúmulos de galaxias se agrupan en enormes supercúmulos, que se reparten el espacio con vacíos inmensos. Tales estructuras se originaron en las interacciones de alta energía del universo primitivo

Jack O. Burns

Diez años atrás, la mayoría de los astrónomos sostenía que, considerado a gran escala, el universo era amorfo y carente de estructura. Se creía que las agregaciones de materia tales como los cúmulos de galaxias se distribuían uniformemente por el espacio. Observaciones recientes han demostrado que no sucede así. Incluso en las mayores dimensiones observables, la materia luminosa del universo se reúne en agrupaciones que parecen tener ciertas formas características, aunque no muchas. Supercúmulos enormes —es decir, cúmulos de cúmulos galácticos— comparten el universo con vacíos asimismo inmensos, regiones que apenas contienen materia luminosa, si es que llegan a poseerla. ¿Cuál es el origen de tales estructuras? ¿Cómo aparecieron? ¿Qué explicación darles?

A lo largo de los últimos años, astrónomos, físicos de partículas y cosmólogos han unido sus esfuerzos para resolver esas cuestiones. Gracias a ese empeño conjunto hemos avanzado gran trecho en nuestro conocimiento de la estructura observada en el universo actual. Compete al astrónomo buscar y representar las estructuras mayores, determinando las características que les son comunes; propio del físico es descubrir la naturaleza de las leyes que gobernaron el universo primitivo y condicionaron la formación de las estructuras primigenias; tarea del cosmólogo es describir con precisión cómo se formaron, bajo el gobierno de estas leyes, las estructuras primitivas y cómo evolucionaron hacia las estructuras que los astrónomos contemporáneos han localizado y representado.

Las mayores estructuras encontradas y representadas hasta ahora, los supercúmulos, son largos filamentos o suerte de envolturas constituidos, a su vez, por muchos cúmulos galácticos. Los cúmulos de galaxias tienden a adquirir una forma bastante esférica y llegan a

alojar, cada uno, cientos de miles de galaxias. Los supercúmulos constan de varias decenas de cúmulos ensartados como las cuentas de un collar. El supercúmulo mayor se extiende en una longitud de más de mil millones de años luz. Los espacios vacíos, cientos de veces menos densos que los supercúmulos, separan a éstos entre sí.

El descubrimiento de los supercúmulos y de los espacios vacíos constituye uno de los avances más importantes registrados en astronomía observacional durante el pasado decenio. Avances de parejo tenor en el campo de la física de partículas permiten comprender la creación y la evolución de esas estructuras. Las realmente grandes que observamos en la actualidad son, de hecho, resultado de perturbaciones muy pequeñas que se produjeron en el universo primitivo. A medida que el universo se expandía y enfriaba, tras la gran explosión (“big bang”), la única fuerza unificada de la naturaleza se diversificó en las cuatro variantes que conocemos hoy: gravedad, electromagnetismo y fuerzas nucleares fuerte y débil.

La separación de las fuerzas y la naturaleza cuántica de las interacciones en el universo primitivo provocaron minúsculas fluctuaciones de la densidad en un fondo que, de otro modo, hubiera sido uniforme. Las fluctuaciones crecieron a medida que el universo se expandía, alcanzando finalmente las proporciones de los supercúmulos. Así pues, en cierto sentido, estas estructuras son los restos fosilizados de procesos de alta energía que ocurrieron poco después de la creación del universo.

Lo primero que hay que hacer para comprender las grandes estructuras es representar sus formas y su distribución en el espacio. Esa cartografía exige, a su vez, que los investigadores determinen las posiciones tridimensionales de las galaxias y los cúmulos. El

proceso de obtención de estos datos consta de dos etapas.

Consiste la primera en trazar una imagen bidimensional de las posiciones de las galaxias y los cúmulos según se perciben desde la Tierra. Durante los años cincuenta, el Observatorio Palomar, en colaboración con la Sociedad Geográfica Nacional estadounidense, fotografió todo el cielo del hemisferio Norte, consiguiendo imágenes de objetos de un brillo un millón de veces más débil que el de los objetos distinguibles a simple vista. En 1958, George O. Abell, ya fallecido, del Instituto de Tecnología de California, examinó las placas de ese análisis del cielo, a fin de detectar cúmulos galácticos. Llamó cúmulo a toda aglomeración de galaxias donde hubiera, al menos, 50 galaxias brillantes dentro de una esfera de un radio de 6,5 millones de años luz. Abell encontró 2712 cúmulos, y, si nos atenemos a los radios mayores, algunos incluyen miles de galaxias.

La segunda etapa en la representación de macroestructuras consiste en determinar la posición de cada objeto en el espacio tridimensional: hallar cuánto dista de la Tierra cada objeto. Para inferirlo, se examina el espectro de la luz emitida por el objeto. En virtud de los procesos atómicos que se desarrollan en las atmósferas de las estrellas que las forman, las galaxias emiten una luz que es particularmente intensa en determinadas frecuencias. Como las demás galaxias se están alejando de la Vía Láctea, el espectro de cada una de ellas aparecerá desplazado hacia el rojo, hacia mayores longitudes de onda del espectro (igual que la bocina de un automóvil que se está alejando parece emitir en un tono más bajo que la bocina de otro que está quieto). La proporción en que el espectro de cada galaxia se desplaza hacia el rojo nos mide con qué rapidez se aleja ésta. En 1929, Edwin P. Hubble mostró que las galaxias se están alejando de la Tierra por-

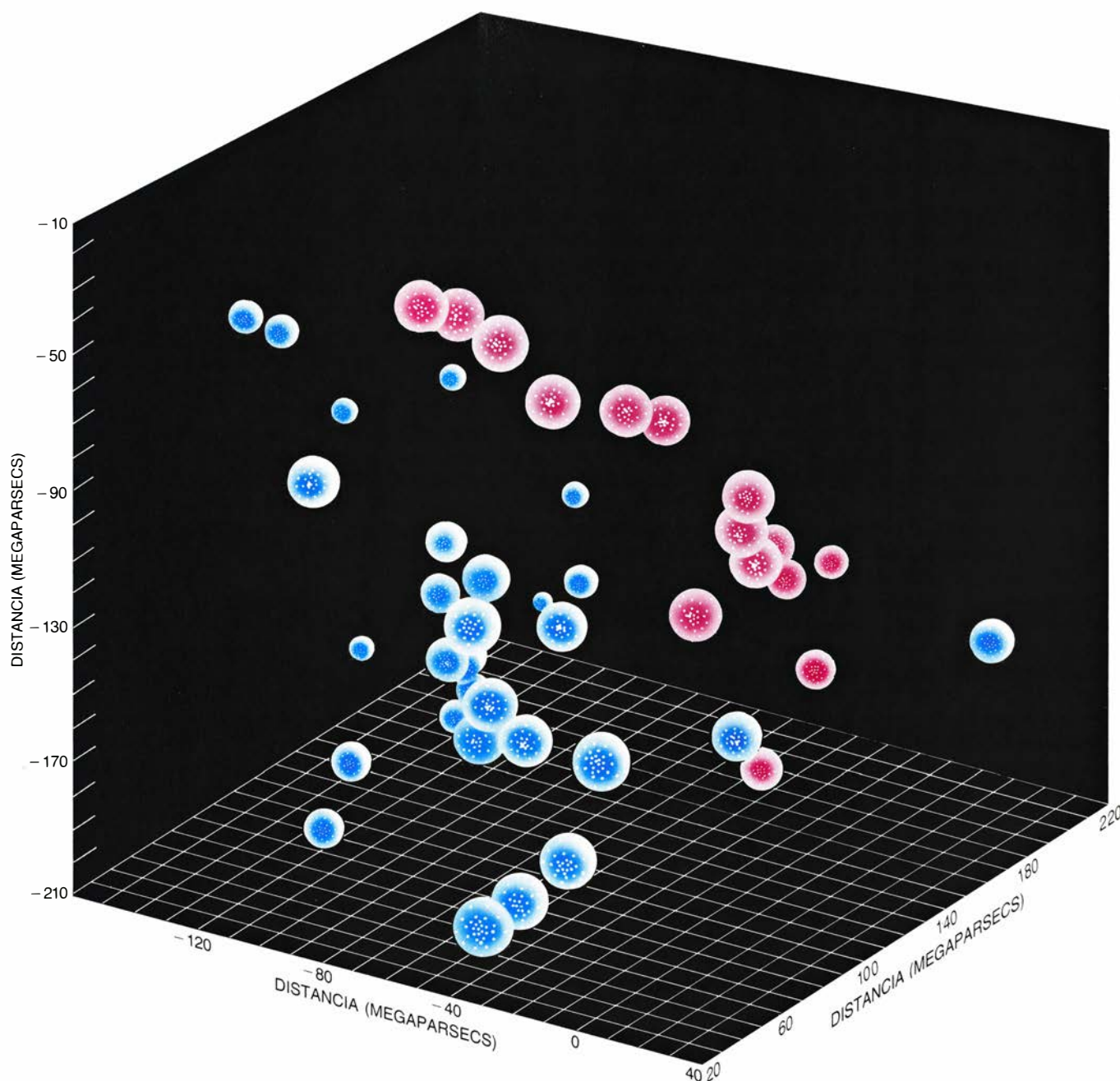
que el universo entero se halla en expansión; señaló también que las galaxias más remotas se alejan a velocidades mayores y, por tanto, tienen desplazamientos hacia el rojo más grandes. Así pues, el valor de desplazamiento hacia el rojo de una galaxia constituye una buena indicación de su distancia de la Tierra.

Hasta hace poco, los análisis de los desplazamientos hacia el rojo de las galaxias gozaban de un alcance limitado, ya que requieren grandes can-

tidades de tiempo y telescopios de aberturas muy grandes. Nuevos detectores, que son más rápidos y que captan cantidades mayores de la luz disponible, han facilitado enormemente los análisis generalizados, recortando drásticamente el tiempo de telescopio necesario. El análisis más ambicioso hasta ahora realizado, en el que se invirtieron cinco años de observación y de estudio de los datos, lo acaban de terminar John P. Huchra, Marc Davis y sus colaboradores del Centro de Astrofísica del Observatorio del Colegio

de Harvard y del Observatorio Astrofísico Smithsonian. Midieron los desplazamientos hacia el rojo de todas las galaxias del hemisferio Norte de magnitud mayor que 14,5 (un brillo unas 2500 veces más débil que el perceptible a simple vista). Las galaxias de esta magnitud más alejadas distan unos 300 millones de años luz.

Estos datos, utilizados conjuntamente con otros desplazamientos hacia el rojo determinados por R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai en Honolulu, han proporcionado un mapa



1. LA MAYOR ESTRUCTURA CONOCIDA del universo es un supercúmulo, o cúmulo de cúmulos galácticos, en forma de filamento (*esferas rojas*); se halla en la región de las constelaciones Perseo y Pegaso y tiene una longitud de más de mil millones de años luz. Casi toda la materia luminosa del universo se aloja

en supercúmulos separados por enormes vacíos esféricos o elípticos. En esta ilustración, que se basa en un modelo construido por David J. Baturski, las esferas representan cúmulos. La Tierra se halla en el punto (0,0,0) de este sistema de coordenadas en megaparsecs (un megaparsec son $3,26 \times 10^6$ años luz).

completo del supercúmulo local donde se inscribe nuestra galaxia. Este supercúmulo consta de un núcleo formado, al menos, por once cúmulos de galaxias distintos y enlazados entre sí por puentes de baja densidad constituidos por galaxias individuales. Rodea al núcleo un halo formado por hasta 50 grupos de galaxias adicionales y de miles de galaxias individuales, distribuidos dentro de una esfera cuyo diámetro es de unos 100 millones de años luz. Hay indicios claros de que este supercúmulo local se ramifica y engarza con otros supercúmulos alejados.

Otros análisis de desplazamientos

hacia el rojo, que han cubierto escalas angulares menores aunque distancias mayores, han proporcionado también información de importancia crítica acerca de los supercúmulos. Recordemos el descubrimiento de la existencia de estructuras significativas en escalas de cientos de millones de años luz, realizado, en 1978, por Stephen A. Gregory, Laird A. Thompson y William G. Tifft, por aquel entonces en la Universidad de Arizona. Habían ellos observado una franja de cielo de sólo 15 grados de anchura. Vieron cómo una fina cadena de galaxias conectaba dos cúmulos nutridos, el cúmulo Coma y

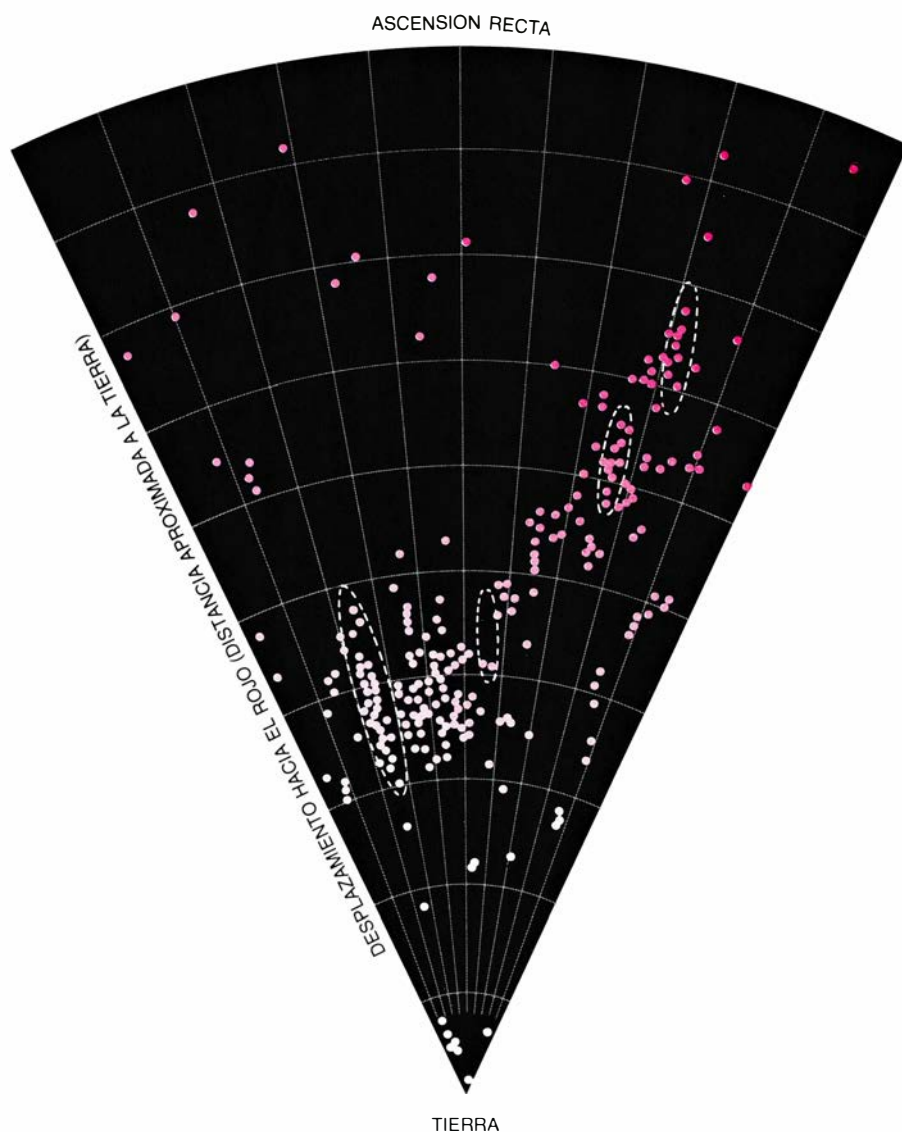
Abell 1367. Encontraron una zona vacía aproximadamente esférica, situada allende el supercúmulo y casi del tamaño del propio supercúmulo.

Tras el trabajo de Gregory, Thompson y Tifft, se han descubierto y explorado una docena larga de supercúmulos más, incluidos varios que están en las direcciones de las constelaciones de Perseo, Hércules, Osa Mayor y Piscis. El supercúmulo de Hércules, con más de 260 millones de años luz de longitud, consta de seis cúmulos Abell y de los puentes que los ligan.

En 1981, Robert P. Kirshner y varios colaboradores suyos de la Universidad de Michigan hallaron un vacío desconocido en la constelación de Boötes. Esta región, cuyo diámetro mide unos 250 millones de años luz, queda delimitada por "paredes" de galaxias. La región central de la zona vacía está llamativamente libre de galaxias normales, elípticas y espirales, aunque trabajos recientes del propio Kirshner, y J. Ward Moody, de la Universidad de Nuevo México, indican que en el núcleo de la zona vacía quizás hubiera algunas galaxias enanas débiles.

En investigaciones más recientes aún, Valérie de Lapparent, Margaret J. Geller y Huchra, de Harvard y el Centro Astrofísico Smithsonian, han ampliado el análisis de una franja de 1176 grados, realizado por el Centro Astrofísico, midiendo los desplazamientos hacia el rojo de galaxias de magnitudes muy bajas: 15,5. Y se han encontrado con series de prolongaciones filamentosas que emanan de Coma, un cúmulo abundante en galaxias. Entre los filamentos, hay vacíos cuyos diámetros miden unos 100 millones de años luz. Apoyados en estas observaciones, los investigadores han propuesto una teoría del universo de tipo "burbuja", según la cual galaxias y cúmulos forman las superficies de estructuras parecidas a burbujas gigantes. La burbuja máxima tendría un diámetro comparable al del vacío descubierto por Kirshner en 1981.

¿Cuál es el tamaño máximo de las estructuras de los supercúmulos? La pregunta ha permanecido abierta debido, en parte, a que ni siquiera el 1 por ciento del volumen del universo situado a un alcance de unos miles de millones de años luz de la Tierra ha recibido el análisis adecuado. Puede haber más de un millón de galaxias dentro de este volumen, y la cantidad de tiempo de telescopio necesario para estudiar los desplazamientos hacia el rojo a estas distancias convierten di-



2. DIAGRAMA DE CUÑA que representa una parte del supercúmulo de Perseo-Pegaso (*formación filamentosa de la derecha*). Los puntos simbolizan galaxias cuyas posiciones se ilustran según su ascensión recta (una variable que describe parcialmente la posición de un objeto según se observa desde la Tierra) y su distancia aproximada a la Tierra (variable ésta que no puede observarse directamente). La distancia a la Tierra de una galaxia se calibra midiendo cuánto se desplaza hacia el rojo, hacia longitudes de onda mayor, el espectro que emite. El desplazamiento hacia el rojo de una galaxia es directamente proporcional a la velocidad con que se aleja de la Tierra. El alejamiento de las galaxias débese a la expansión global del universo, de manera que las galaxias más distantes tienen, en general, desplazamientos hacia el rojo mayores. Los cúmulos de Abell (los cúmulos de galaxias mejor catalogados y más brillantes) están rodeados por líneas blancas a trazos. Muchos de los desplazamientos hacia el rojo que se indican fueron proporcionados por John P. Huchra del Centro de Astrofísica del Observatorio de Harvard y el del Astrofísico Smithsonian.



3. CUMULO DE GALAXIAS en la constelación Virgo; presenta una forma casi esférica e incluye casi todos los tipos de galaxias conocidos. Los supercúmulos

constan de varias decenas de tales cúmulos galácticos, (que, a su vez, albergan cientos o miles de galaxias), ensartadas como las cuentas de un collar.

chos exámenes en fruto inalcanzable con la tecnología actual.

Un punto de posible arranque quizá fuera intentar obtener alguna pista de dónde ubicar los candidatos a estructuras de supercúmulo, y rastrear entonces la región. Si se pudiera encontrar algún indicio de estructuras de supercúmulo (alguna señal de regiones donde pudiera haber éstos), los astrónomos tendrían un método potente de representar rápidamente macroestructuras del universo.

Durante cuatro años, David J. Batuski (alumno de doctorado del autor en la Universidad de Nuevo México) y yo mismo hemos estado trabajando en esa orientación. Partimos de la observación de que todos los supercúmulos descubiertos hasta la fecha estaban formados, en parte, por cúmulos nutridos (integrados por un elevado número de galaxias) conectados entre sí a través de puentes de baja densidad. Por tanto, los grupos estrechamente espaciados de cúmulos nutridos pueden constituir un lugar razonable donde buscar macroestructuras. Opinábamos,

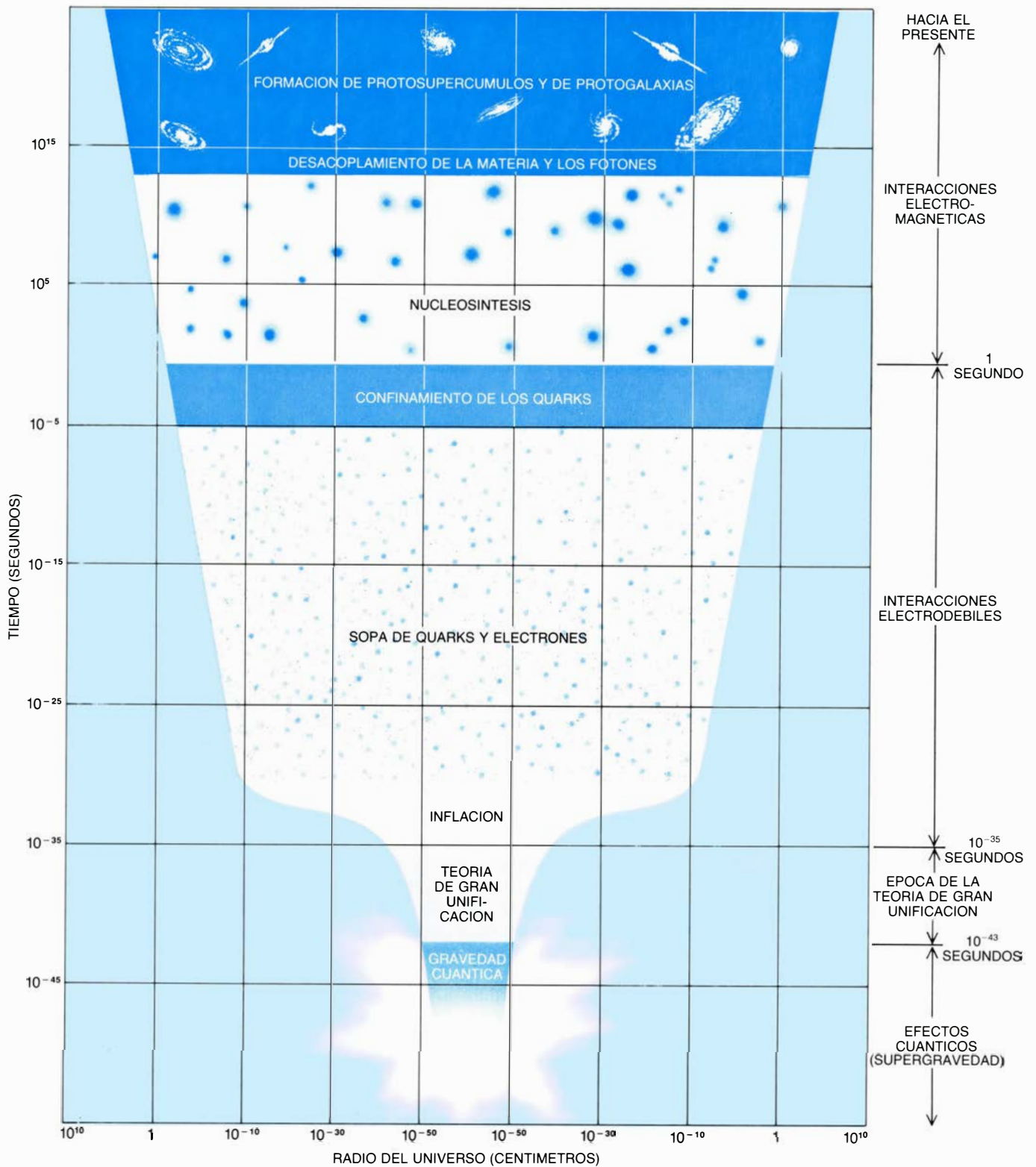
en concreto, que los cúmulos de Abell, por lo común bastante ricos y cuyas posiciones se hallan bien catalogadas, podrían proporcionar el indicador que se necesita para encontrar y representar las posiciones de los supercúmulos más nutridos, al menos.

Abell había advertido, a principios de los años sesenta, que los cúmulos de galaxias descubiertos por él podían, a su vez, agruparse entre sí, pero no pudo avanzar en su hipótesis porque no disponía de las medidas de desplazamientos hacia el rojo necesarias. En nuestros días, se llevan medidos los desplazamientos hacia el rojo de más de 560 cúmulos de Abell. El desplazamiento hacia el rojo de un cúmulo se determina cuantificando los desplazamientos hacia el rojo de entre tres y cinco de las galaxias más brillantes del cúmulo en cuestión; este proceso requiere una dedicación de tiempo moderada; se ha demostrado empíricamente que da resultados precisos.

Batuski y el autor, para empezar, reunieron cuantos desplazamientos hacia el rojo de los cúmulos de Abell si-

tuados a una distancia de menos de 1400 mil millones de años luz se hubieran medido, publicados o no. Estimaron la distancia de los cúmulos de Abell cuyos desplazamientos hacia el rojo no se habían medido, aplicando la regla, bastante segura, según la cual la magnitud de la décima galaxia más brillante de un cúmulo nos ofrece una buena indicación de la distancia a que se halla el mismo.

Tras obtener las posiciones tridimensionales de 652 cúmulos de Abell, Batuski diseñó un algoritmo de ordenador para buscar estructuras globales mediante el método de percolación. El ordenador examinaba un volumen esférico de un radio de 130 millones de años luz centrado en un cúmulo de Abell elegido al azar. Si en el interior del volumen había algún cúmulo de Abell vecino, el ordenador consideraba que los dos cúmulos pertenecían a una misma formación y examinaba también una esfera centrada en el segundo. El proceso se repetía en todo el volumen en el que se sabe que hay cúmulos de



4. ACONTECIMIENTOS DEL UNIVERSO PRIMITIVO. Determinaron la naturaleza de las macroestructuras observadas actualmente. En los 10^{-43} segundos subsiguientes a la gran explosión ("big bang"), las cuatro fuerzas fundamentales que se conocen estaban unificadas en una única fuerza. Aún no se ha construido una teoría adecuada para describir este período; tal teoría debería combinar las estructuras teóricas de la relatividad general y de la mecánica cuántica. Las fluctuaciones cuánticas durante esta fase original del universo podrían haber creado las semillas de las grandes estructuras que se formaron después. Transcurridos 10^{-43} segundos de vida del universo, la gravedad se "congeló" respecto de las otras tres fuerzas, adquiriendo características únicas y generando interacciones distintas. Las otras tres fuerzas permanecieron unificadas. A los 10^{-35} segundos de la gran explosión, la fuerza nuclear fuerte se congeló, separándose de la fuerza electrodébil (que es combinación de la fuerza nuclear débil y del electromagnetismo), causando la expansión rápida del universo.

Desde dicho instante hasta 10^{-6} segundos después, el universo se convirtió en una sopa caliente de quarks y electrones. Cuando el universo cumplió su segundo de edad, las fuerzas electromagnéticas y débiles se disociaron. El universo se había enfriado entonces lo suficiente para que los quarks fueran capaces de unirse entre sí y engendrar protones. Durante los 100.000 años posteriores, la materia y la radiación se mantuvieron fuertemente acopladas: las regiones que eran densas en materia lo eran también en radiación. Durante este período, los protones y los electrones se unieron para formar neutrones, y los protones y neutrones se unieron entre sí para originar núcleos de átomos de helio, deuterio y litio, en un proceso de nucleosíntesis. Entonces, la materia se desacopló de la radiación y el universo se volvió transparente: la radiación podía circular con entera libertad. Durante esa época, las fluctuaciones de la densidad de materia empezaron a formar protogalaxias y protosupercúmulos, estructuras que, con el transcurso del tiempo, evolucionarían en galaxias y supercúmulos.

Abell. La región en donde se encontraba que los cúmulos de Abell tenían vecinos próximos se la consideraba un candidato a supercúmulo.

Con este algoritmo, se halló un total de 102 candidatos. Para comprobar la validez de tal algoritmo (y, por tanto, la trascendencia de nuestros hallazgos), realizamos una serie de simulaciones en las que 652 cúmulos se distribuían al azar en un volumen igual al volumen real del espacio sometido a estudio. Se aplicó entonces dicho algoritmo a estas distribuciones simuladas para ver cuántos candidatos a supercúmulo aparecían en una distribución aleatoria. Esa comparación reveló que la probabilidad de que los candidatos que se habían encontrado primero fueran meras coincidencias, y no indicios de una estructura subyacente, no llegaba, ni de lejos, a una parte en un millón.

Nos alentó, además, averiguar que el algoritmo había identificado, como candidatos a supercúmulos, a todos los ya conocidos por tales. Ello hacía menos probable aún que existieran supercúmulos sin identificar. La diferencia principal entre cómo se venían conociendo estos supercúmulos y cómo el algoritmo los había identificado residía en que dicho algoritmo sugería que eran mucho más extensos que lo que se había supuesto. Por ejemplo, se creía que el cúmulo de Hércules tenía seis cúmulos de Abell; el algoritmo manifestaba que podía alojar hasta 42.

Además de rastrear posibles supercúmulos, buscamos candidatos a vacíos. Utilizando un algoritmo distinto, se identificaron volúmenes de espacio con diámetros de 160 millones de años luz, por lo menos, sin cúmulos de Abell. Se detectaron 29 candidatos a vacío, todos ellos esféricos o elípticos.

Identificados los candidatos a supercúmulo, nos aprestamos a determinar si los cúmulos de Abell que formaban cada candidato mantenían una conexión real. Se trata de un proyecto a largo plazo que tardará años en completarse. Empezamos midiendo los desplazamientos hacia el rojo de cúmulos nutridos cuyas posiciones y desplazamientos estimativos hacia el rojo manifestaban que pertenecían a tres de los mayores candidatos a supercúmulos; examinamos también algunos cúmulos menos abastecidos y algunas galaxias que parecían estar entre los cúmulos de Abell de candidatos a supercúmulo. Para asegurarnos de que nuestro método de búsqueda no quedara sesgado por el hallazgo preferencial de supercúmulos filamentosos, medimos

también los desplazamientos hacia el rojo de los cúmulos y galaxias situados en las zonas laterales de esos eventuales puentes.

Dicho examen produjo un resultado de particular interés: encontramos una cuerda lineal de cúmulos y galaxias, en la región de las constelaciones Perseo y Pegaso, que tiene una longitud de más de mil millones de años luz. Se trata de la mayor macroestructura conocida del Universo. Empieza con el supercúmulo de Perseo, descubierto con anterioridad, y se curva ligeramente hacia el Sur, alejándose de la Tierra a lo largo de la visual. El filamento se compone de 16 cúmulos de Abell en perfecta alineación; ningún intervalo entre los cúmulos supera los 160 millones de años luz. Los intervalos que existen están parcialmente llenos de una combinación de cúmulos poco abundantes y de galaxias individuales.

El filamento sorprende, en particular, por las tres zonas vacías que lo rodean. Cada vacío tiene un diámetro aproximado de 300 millones de años luz, está exento de cúmulos y bastante libre nutrido de galaxias brillantes. Estamos convencidos de que se trata de vacíos reales, y no de regiones oscurecidas por las nubes de polvo de la Vía Láctea: casi todo el filamento y la mayor parte de los vacíos están alejados del plano de nuestra galaxia.

El filamento puede ser más largo de lo que parece; quizá no acabe en el supercúmulo de Perseo. Hace varios años, Riccardo Giovanelli y Martha P. Haynes, de la Universidad de Cornell, sugirieron que el supercúmulo de Perseo podía extenderse hacia el Noreste para conectarse con el supercúmulo de la Osa Mayor. Esta conjetura será difícil de confirmar, debido a que cualquier puente entre los supercúmulos estaría detrás del plano de la Vía Láctea, muy oscurecido. Giovanelli y Haynes realizan observaciones de radiofrecuencia, a longitudes de onda de unos 21 centímetros que, normalmente, no están oscurecidas por los fondos de polvo. Si los dos supercúmulos mantienen una conexión real, el filamento entero tendría una longitud de más de 1300 millones de años luz.

¿Es este filamento mera alineación accidental de cúmulos y galaxias? Para comprobarlo, Batuski y el autor realizaron otra serie de simulaciones en las que el ordenador distribuía cúmulos al azar en un volumen equivalente al que ocupan en realidad los cúmulos de Abell; establecimos que los pseudocúmulos siguieran las correlaciones esta-

dísticas encontradas en los cúmulos de Abell reales. No fue posible reproducir aleatoriamente ningún filamento que se pareciera al supercúmulo Perseo-Pegaso; y así concluimos que un alineamiento accidental de tantos cúmulos a tales distancias presentaba una probabilidad inferior al 0,3 por ciento. Sin embargo, cabe añadir que el filamento Perseo-Pegaso parece ser una excepción entre las distribuciones de cúmulos del catálogo de Abell. No se conoce ningún otro filamento de tal longitud y grado de alineamiento; ni se sabrá seguro si existen otros filamentos de esos mientras no se explore un volumen de espacio mucho mayor que el analizado por Batuski y el autor.

Nuestro análisis del catálogo de Abell indica que los supercúmulos y los vacíos son estructuras muy corrientes en el universo. Lo que obliga a preguntarnos si esas estructuras desarrollan un esquema común. ¿Son independientes entre sí los supercúmulos, los filamentos y los vacíos? ¿Se interrelacionan acaso para tejer un tapiz cósmico? En 1980, Jaan Einasto, M. Jöeveer y Enn Saar, del Observatorio Astrofísico Struve, de Estonia, sugirieron que los supercúmulos y los vacíos podían formar una estructura celular. El universo se parecería a una esponja gigante o a un queso suizo, ya que la mayor parte de la materia luminosa se concentraría en paredes celulares separadas por grandes regiones vacías. Los filamentos alargados y lineales estarían en las intersecciones entre las paredes de las células. Es aún demasiado pronto para decir si el universo presenta semejante regularidad o si ofrece una distribución irregular de estructuras de supercúmulos, algunas de ellas ligadas entre sí.

¿Qué es lo que explica la existencia de tales macroestructuras? Para contestar la pregunta hay que retrotraerse en el tiempo, centrarse en los procesos energéticos que ocurrieron al poco de la gran explosión. Los progresos recientes en el dominio de la física de partículas de alta energía han suministrado valiosa información sobre las condiciones reinantes entonces. El empeño por construir una teoría de gran unificación, que describa todas las fuerzas de la naturaleza como aspectos de una única fuerza, ha llevado a los físicos a examinar regímenes de muy alta temperatura y energía. Tales condiciones sólo podrían haberse dado durante una pequeña fracción de segundo inmediatamente después de la creación.

No existe aún una teoría adecuada

para describir el comportamiento del universo en los 10^{-43} segundos subsiguientes a la gran explosión. En dicho instante, los campos gravitacionales del universo habrían alcanzado una extraordinaria intensidad y habrían actuado a distancias muy cortas. La descripción adecuada de tales condiciones necesita una teoría que combine la teoría general de la relatividad, que es la teoría normalmente aceptada de la gra-

vedad, y la teoría cuántica. No se ha formulado aún una teoría completa de la gravedad cuántica [véase “Gravedad cuántica”, por Bryce S. DeWitt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1984]. Muchas de las fluctuaciones de la densidad de materia que se desarrollaron con posterioridad en el universo, formando supercúmulos y galaxias, pudieron haber tenido su origen en fluctuaciones cuánticas (inhomogeneidades en

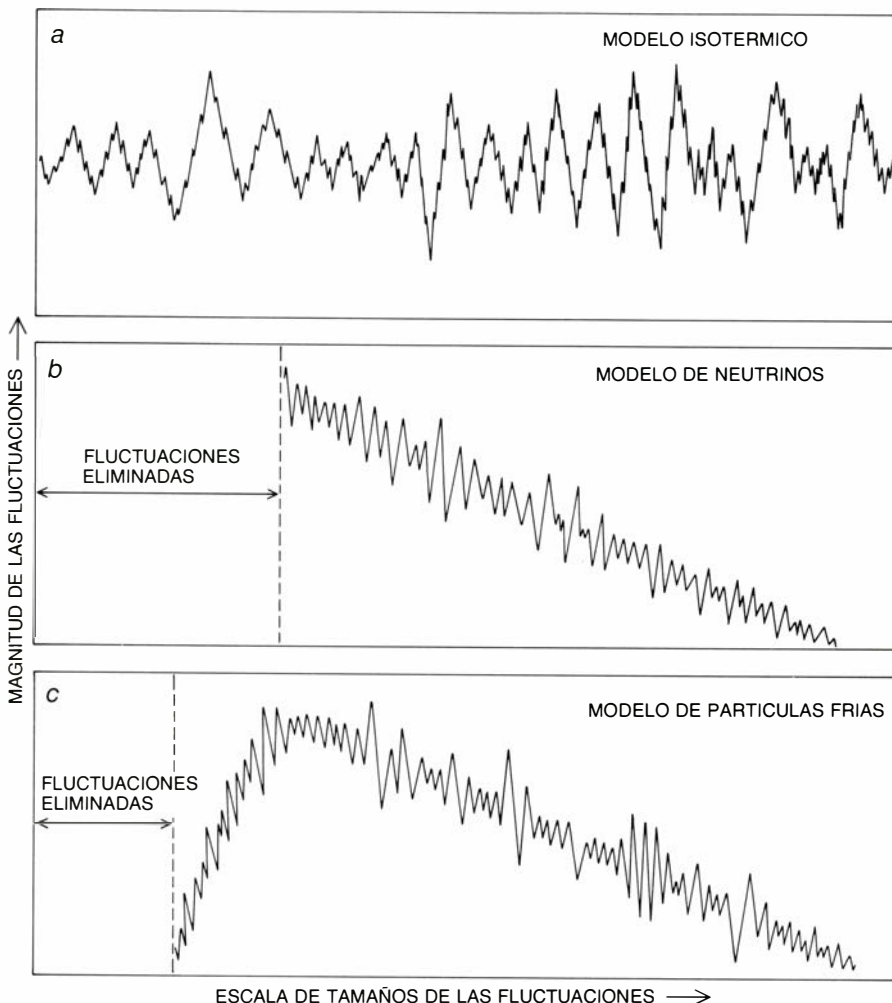
la densidad de materia y energía producidas aleatoriamente) que surgieron durante este periodo, cuando el diámetro del universo no llegaba a los 10^{-50} centímetros.

Transcurridos unos 10^{-43} segundos, la gravedad empezó a “congelarse”, es decir, a adquirir características únicas, distintas de las de la fuerza unificada remanente, y a propiciar interacciones diferentes. Desde aquel instante, la gravedad ha seguido su propio camino. Hoy constituye la fuerza dominante a grandes distancias. Permanecieron unificadas: la fuerza electromagnética, que en el estadio actual del universo actúa en escalas macroscópicas y microscópicas y es la fuerza dominante en el rango propio de las distancias atómicas; la fuerza nuclear débil, que interviene sólo dentro de los núcleos atómicos y es responsable de la desintegración radiactiva y de otros procesos radiactivos; y la fuerza fuerte, que opera también únicamente dentro del núcleo y liga los quarks entre sí para constituir protones y otras partículas parecidas.

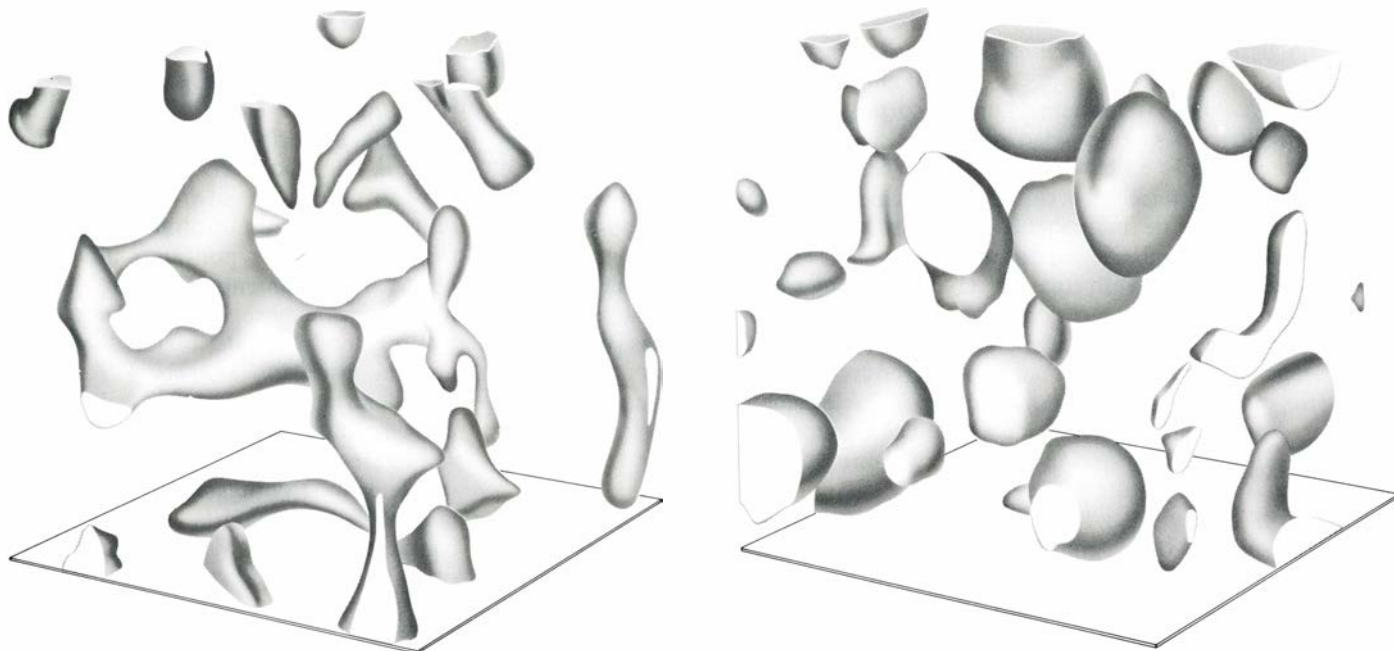
Transcurridos 10^{-35} segundos de la gran explosión, la fuerza fuerte se separó de la electrodébil (combinación de las fuerzas electromagnética y débil). Alan H. Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha sugerido que la separación de la fuerza débil provocó una fase de rápida expansión, o inflación, durante la cual el universo creció 50 órdenes de magnitud en 10^{-32} segundos [véase “El universo inflacionario”, por Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984].

Entre los 10^{-35} y los 10^{-6} segundos, el universo consistió en una sopa muy caliente de electrones y quarks libres (quarks que no estaban ligados formando partículas mayores). La temperatura del universo era aún tan alta que los quarks no podían unirse todavía entre sí y constituir partículas del tipo de los protones. Cualquier engarce entre quarks hubiera saltado debido a la energía térmica. Hacia los 10^{-6} segundos, el universo se había enfriado lo suficiente como para que los protones pudieran formarse. Sólidas pruebas experimentales permiten afirmar que ya no hay quarks sueltos.

Cuando el universo cumplió su primer segundo de vida, se disociaron las fuerzas electromagnéticas y débiles. Sabemos bastante de lo ocurrido en esa época porque, al revés de lo que sucede con las energías implicadas en la gran unificación de las fuerzas electro-



5. FLUCTUACIONES DE LA DENSIDAD DE MATERIA en el universo primitivo; dichas fluctuaciones pudieron haber surgido en escalas de tamaño distintas. El tamaño de las primeras fluctuaciones que se desarrollaron habría determinado el adquirido por las primeras estructuras que crecieron, desempeñando así un papel importante en la naturaleza de las macroestructuras del universo posterior. En un modelo isotérmico (a), en el que la radiación térmica de fondo en el universo primitivo es aproximadamente la misma así un papel importante en la naturaleza de las macroestructuras del universo posterior. En un modelo en todas las escalas de tamaños. Las primeras estructuras en crecer serían, entonces, las menores, las más sencillas, verbigracia, las protogalaxias, que más tarde se asociarían en virtud de sus mutuas atracciones gravitatorias para engendrar protocúmulos y protosupercúmulos. Se le ha denominado modelo “abajo-arriba” porque las estructuras más pequeñas se formarían en primer lugar. En otro modelo (b), el universo gravitatorias para engendrar protocúmulos y protosupercúmulos. Se le ha denominado modelo “abajo-densidad, como si se tratara de un obús lanzado con celeridad contra un muro de piedras. Con el frenado de los neutrinos vendrían las fluctuaciones. Sin embargo, todas las fluctuaciones de escala menor habrían quedado eliminadas, de manera que las primeras fluctuaciones serían de la misma escala que el horizonte del universo (la distancia que desde la gran explosión podría haber atravesado un fotón). Las fluctuaciones a escalas distintas, incluso mayores, aparecieron luego, a medida que el universo se expandía; pero no llegarían a dominar en la estructura del universo. Estamos hablando del modelo “arriba-abajo”, así llamado porque las fluctuaciones primitivas, de gran escala, se condensaron primero para formar los objetos mayores (protosupercúmulos), que después se fragmentaron en estructuras menores. En una variante de este modelo (c), las partículas primitivas no son neutrinos, sino ciertas partículas muy masivas predichas en la nueva teoría de la supersimetría. Por ser éstas más lentas (más frías) que los neutrinos, las fluctuaciones podrían formarse antes, y a escalas menores, que en el modelo de neutrinos. A las fluctuaciones de pequeña escala sucederían muy pronto las de gran escala. Eso es lo que defiende el modelo “abajo-arriba” híbrido.



6. SUPERCUMULOS Y VACIOS formados en un universo dominado por neutrinos, de acuerdo con la representación realizada mediante superordenadores por Joan M. Centrella, de la Universidad Drexel, y Adrian L. Melott, de la

Universidad de Chicago. Estos modelos predicen que la materia se asociaría en una suerte de estructuras en forma de cáscaras y filamentos (*izquierda*) alternando, en una estructura celular, con vacíos esféricos o elípticos (*derecha*).

débiles y fuertes, las energías necesarias para observar la unificación de las fuerzas electromagnéticas y débiles pueden obtenerse en los aceleradores de partículas de alta energía. A mediados de los años setenta, Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Lee Glashow describieron, por primera vez, cómo las fuerzas electromagnéticas y débiles se unificaban a altas energías; en 1983, Carlo Rubbia y sus colaboradores lograron observar las partículas, llamadas bosones W y Z , que propician las interacciones electrodébiles.

A los 100.000 años del primer segundo de vida del universo, éste estuvo dominado por la radiación remanente de la bola de fuego primigenia. La materia y la radiación se hallaban vigorosamente acopladas; es decir, las regiones de materia densa eran, también, densas en radiación. Durante ese período, algunos protones se unieron a electrones para engendrar neutrones. Empezó, asimismo, el proceso de la nucleosíntesis, en el que los protones, que son núcleos de hidrógeno, se unen para formar los núcleos, más pesados, de helio, deuterio y litio.

Al cerrarse ese intervalo de 100.000 años desde la creación, la materia empezó a desacoplarse de la radiación y el universo se tornó transparente por primera vez: la radiación podía fluir a través del universo sin interferir demasiado con la materia, y las fluctuaciones de la densidad de materia ya no estaban acompañadas de fluctuaciones de

la densidad de radiación. Esta época marcó también el inicio del período en el que los supercúmulos y las galaxias crecieron rápidamente a partir de los gérmenes formados en las anteriores fluctuaciones de densidad. Esta era, dominada por la materia, ha durado hasta el tiempo presente, unos 15.000 millones de años después de la gran explosión.

Las partículas producidas en las varias fases del universo primitivo influyeron poderosamente en su configuración estructural. Pequeñas fluctuaciones en la densidad de estas partículas en el espacio dieron lugar, andando el tiempo, a los supercúmulos. Ni siquiera en sus primeras épocas, el universo fue nunca perfectamente homogéneo. Las fluctuaciones mecánico-cuánticas, siempre presentes, destacaron por su importancia en la era de la gravedad cuántica. Además, la congelación de las fuerzas fundamentales fue un proceso turbulento y desorganizador. Las fluctuaciones de densidad que engendraron galaxias, cúmulos y supercúmulos podrían haberse iniciado de diversas maneras. Al cosmólogo compete descubrir los mecanismos.

Gracias a los avances de la física y la astronomía, los cosmólogos han dispuesto de mejor información para trabajar y han podido refinar sus teorías. En los últimos años, se han propuesto tres clases generales de modelos para describir la formación de las estructuras primigenias.

Uno es el llamado modelo “abajo-arriba”, que se inicia con el trabajo realizado, en las postrimerías de los sesenta y comienzos de los setenta, por P.J.E. Peebles y sus colaboradores de la Universidad de Princeton. Estudiaron las fluctuaciones de la densidad de materia en un hipotético universo primitivo que estaba dominado por bariones (materia ordinaria, como los protones y los neutrones). Por razones de simplicidad, supusieron un universo en el que las fluctuaciones de densidad eran isotérmicas, es decir, que la radiación de fondo (y por tanto la temperatura) se distribuía homogéneamente, a pesar de que la materia en el universo estaba muy agrupada. Bajo este conjunto de hipótesis, las fluctuaciones en la distribución de masa formaron, primero, protogalaxias de masas comprendidas entre 100.000 y un millón de veces la masa solar. Las protogalaxias se convirtieron en galaxias que, entonces, se agruparon en cúmulos en virtud de la mutua atracción gravitacional. Este escenario recibe el apelativo de modelo “abajo-arriba” debido a que las estructuras menores (las galaxias) surgen primero y después se convierten en estructuras mayores (supercúmulos).

El modelo “abajo-arriba” se enfrentó con un grave problema a finales de los años setenta, cuando se descubrieron supercúmulos de cientos de millones de años luz de longitud. Sencillamente, no hubo tiempo suficiente, desde la gran explosión, para que se

formaran estructuras tan grandes mediante la agregación gravitacional de las galaxias.

Un segundo modelo considera un universo de fluctuaciones de densidad adiabáticas (fluctuaciones en las que la cantidad de radiación térmica, o calor, en una cantidad dada de materia permanece constante, aun cuando la densidad espacial de la materia fluctúe en el tiempo). En tal universo, la razón entre la densidad de energía de la materia y la de la radiación debe ser la misma en todas las regiones del espacio, de manera que la distribución de radiación se agrupa igual que la distribución de materia. El tamaño y la distribución de tales fluctuaciones de densidad fueron estudiados, a principios de los años setenta, por Edward R. Harrison, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y Yakob B. Zel'dovich, de la Universidad de Moscú. Cada autor los abordó por su cuenta. Guth ha demostrado que una distribución similar surgiría de manera natural en el modelo inflacionario por él propuesto.

En el primer modelo, el isotérmico, las variaciones de densidad tienen lugar en todas las escalas de longitud. En el modelo adiabático sólo se permiten, por contra, fluctuaciones a escalas muy grandes, pues la dinámica de las interacciones entre partículas, y entre partículas y radiación, suprime las perturbaciones menores. En este postrer modelo se forman primero protosupercúmulos, objetos difusos que preceden

a los supercúmulos, que después se colapsan para adquirir mayor densidad y fragmentarse formando galaxias. En correspondencia, se le ha bautizado modelo "arriba-abajo".

Zel'dovich ha demostrado que, en el ambiente del universo primitivo, los protocúmulos tenderían a colapsarse rápidamente en una dimensión, desarrollando una suerte de torta aplanada. Los filamentos lineales se encontrarían en las intersecciones de dos tortas [véase "Macroestructura del universo", por Joseph Silk, Alexander S. Szalay y Yakob B. Zel'dovich; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; diciembre de 1983].

Las primeras versiones del modelo "arriba-abajo" tenían un punto débil importante. En su formulación inicial, Zel'dovich supuso que el universo actual está formado principalmente por bariones. Ahora bien, como este modelo del universo es adiabático, las grandes fluctuaciones de densidad de materia necesarias para producir el nivel de estructura observado deben corresponderse necesariamente con fluctuaciones igualmente grandes en la radiación de fondo. Lo que está en contradicción con el hecho comprobado de un universo lleno de una radiación de fondo virtualmente isotrópica (igual en todas las direcciones).

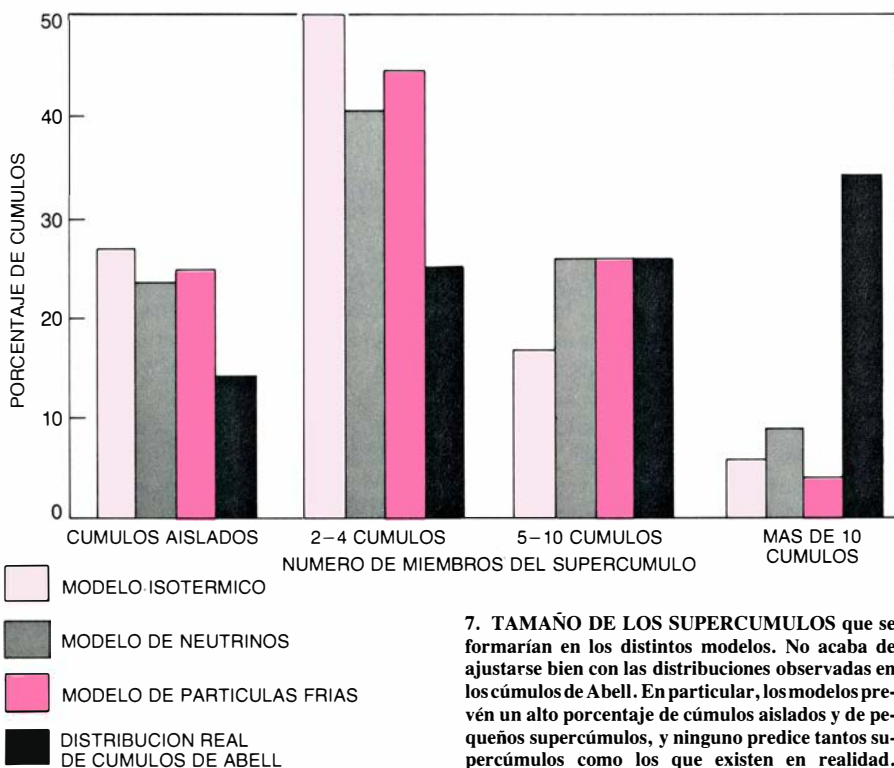
El modelo "arriba-abajo" se mantuvo en pie sacrificando la hipótesis de un universo constituido principalmente de bariones. Aunque la Tierra conste,

casi de manera exclusiva, de dicha materia "normal", el universo entendido en su globalidad podría estar dominado por alguna otra clase de materia. En particular, podría estar hecho de una materia que, a diferencia de los bariones, no tendiera a sufrir interacciones en las que se emiten fotones. Tal materia sería oscura y, por tanto, difícil de observar directamente. Existen ya buenas razones experimentales para creer que alguna clase de materia oscura abunda en ciertos sistemas. Por ejemplo, determinados cúmulos galácticos han de estar constituidos por decenas o centenares de veces la masa que se puede deducir directamente a partir de la cantidad de materia luminosa que contienen; si así no fuera, serían incapaces de retener todo su contingente de galaxias con la sola fuerza de la gravitación.

¿En qué puede consistir la materia oscura? Se ha pensado en los neutrinos. A estas partículas, que interactúan débilmente (tienden a no interactuar con otras partículas), durante muchos años, se las consideró carentes de masa. Pero el avance de la teoría y varios experimentos sin confirmar sugieren ya que el neutrino podría tener masa y ser, por tanto, la partícula constituyente de la materia oscura.

Si el neutrino tiene masa podría desarrollar un papel de suma importancia en el modelo de la torta. Los neutrinos se desacoplaron de la radiación antes de que lo hiciera la materia ordinaria. Cuando se desacoplaron por primera vez, eran muy calientes y movíanse a velocidades cercanas a la lumínica. En virtud de esa gran velocidad y de la baja probabilidad de que interactuaran entre sí, los neutrinos circularon libremente por el universo primitivo: fluyeron a grandes velocidades en todas sus direcciones, sin que el movimiento de los mismos se viera apreciablemente perturbado por la distribución de energía y materia. Esas partículas de circulación libre, rapidísima, tenderían a eliminar cualquier fluctuación en la densidad de materia, a imagen del obús disparado a gran velocidad contra un débil muro de piedras: la colisión apenas frenaría su curso.

Conforme el universo se fue expandiendo, los neutrinos se enfriaron. Cuando su velocidad descendió por debajo de la décima parte de la velocidad lumínica, ya no eliminaron las fluctuaciones de la densidad; y las perturbaciones instadas por ésta empezaron a crecer. El tamaño de las primeras perturbaciones fue el propio de la escala

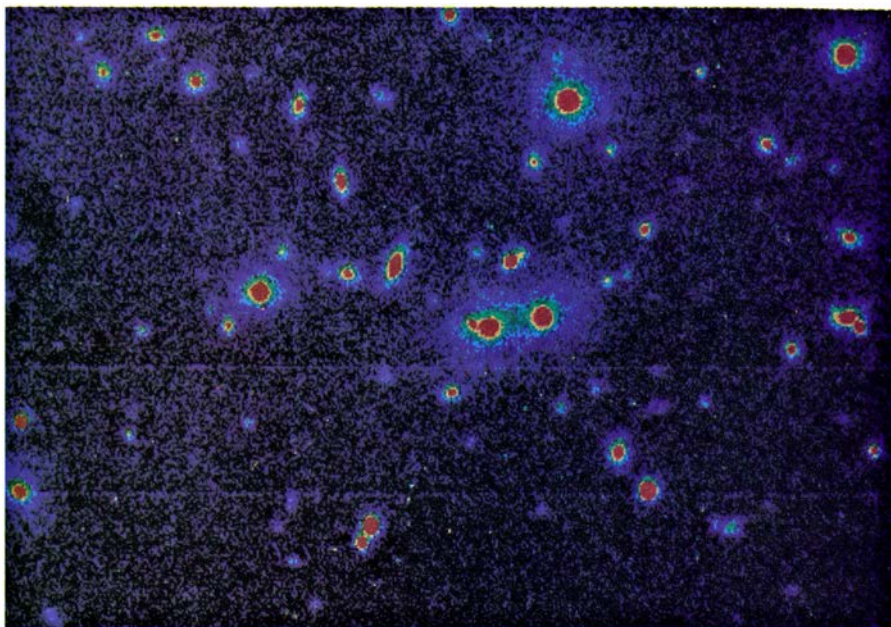


del horizonte (la distancia que podría haber cruzado un fotón en el tiempo transcurrido desde la gran explosión), ya que todas las perturbaciones menores habrían quedado eliminadas por la libre circulación de neutrinos. Entonces, como en el modelo original de la torta, las primeras estructuras en condensarse serían las mayores: los protosupercúmulos. Habrían éstos empezado como fluctuaciones de la densidad de neutrinos. Un neutrino que se moviera lentamente podría ser detenido y absorbido por una fluctuación de densidad; volviendo a la imagen del obús, si avanza a baja velocidad puede rebotar contra un muro de piedras y pararse, añadiendo su propia masa al montón. Más tarde, los bariones cayeron en los supercúmulos de neutrinos, para producir finalmente las estructuras observadas hoy en día.

Este modelo de un universo dominado por neutrinos conduce a tres predicciones que son susceptibles de comprobación observacional. En primer lugar, predice que o no hay materia, ni luminosa ni oscura, en los vacíos o que, si la hay, es muy escasa: cualquier agregación de materia debe provenir de las primeras perturbaciones que formaron los supercúmulos, y éstas surgieron en torno a los vacíos. Para comprobar esta predicción, Kirshner y sus colaboradores están realizando nuevas observaciones examinando el vacío de Boötes, y Gregory y su equipo están haciendo lo propio con el vacío de Coma. Existen ya indicios provisionales de que el vacío de Boötes podría alojar galaxias enanas. Si tales indicaciones persisten después de un análisis detallado, el modelo tendrá problemas experimentales serios.

La segunda predicción comprobable del modelo de la torta, dominado por neutrinos, es que el eje mayor de las galaxias debe tender a alinearse con el eje menor del supercúmulo en que se encuentran (el eje según el cual la torta se aplanó en su comienzo). Dicha alineación, que representaría conservar el recuerdo del colapso unidimensional que inicialmente formó el supercúmulo y sus galaxias constituyentes, fue sugerida por Stephen Gregory y Laird Thompson. Bryan E. Laubscher, Gregory y el autor están actualmente comprobando esta predicción mediante un estudio exhaustivo de la orientación de las galaxias en el supercúmulo de Perseo.

El tercer método para someter a prueba el modelo de neutrinos se apoya en los cálculos realizados me-



8. CUMULO RICO en galaxias. Se halla en la Corona Boreal. Está sacado de una imagen realizada por un nuevo instrumento de carga acoplada del observatorio de la Universidad de Nuevo México. En esta imagen de falso color, el rojo representa la luz óptica más intensa y el azul la menos intensa. Los instrumentos de carga acoplada precisan menos luz y tiempos de observación menores que las placas fotográficas, y, sin embargo, proporcionan una información más detallada de los tamaños, colores y orientaciones de las galaxias. Permiten análisis exhaustivos de la estructura del espacio lejano como nunca se había conseguido. Un mejor conocimiento de las formas y la distribución de las macroestructuras proporcionará los datos necesarios para confirmar las teorías acerca de su origen. La imagen se realizó con equipos obtenidos con ayudas de la Science Foundation, la Research Corporation y la Universidad de Nuevo México.

dante superordenadores por Joan M. Centrella, de la Universidad Drexel, y Adrian L. Melott, de la Universidad de Chicago [véase la figura 6]. Predicen que, en un universo de torta de neutrinos, se formarán estructuras bastante sencillas: las grandes tortas y los filamentos que se originan en las intersecciones de las tortas deben alternarse regularmente con vacíos esféricos. Desde un punto de vista observacional es aún demasiado pronto para decir si existe tal simplicidad y regularidad en las macroestructuras.

Con independencia de lo que resulte de estas pruebas experimentales, el modelo de los neutrinos se enfrenta con algunos problemas potencialmente devastadores, según se deduce de algunas simulaciones por ordenador realizadas por Simon D. M. White, de la Universidad de Arizona, y Marc Davis, de la Universidad de California en Berkeley. Primero, porque los neutrinos tendrían una velocidad tan elevada después de desacoplarse y poseerían una masa ínfima, si la poseyeran, deberían circular libremente durante mucho tiempo antes de enfriarse lo suficiente para permitir que aparecieran fluctuaciones de densidad apreciables. Las perturbaciones no llegarían hasta que el universo adquiriera cierto tamaño y edad, y las primeras galaxias no se for-

marían hasta bastante tarde en la evolución del universo; tan tarde, que sus edades contradirían las aceptadas para algunas de las estrellas más viejas, las cuales se encuentran en los llamados cúmulos globulares, hallados cerca de muchas galaxias.

White y Davis argumentan, asimismo, que el modelo de neutrinos produce un grado de agregación mucho mayor que el que se ha observado, por lo menos, en la región local del universo. Además, debido a la baja masa de los neutrinos y a sus elevadas velocidades, no se ligarían fácilmente a los halos y a los cúmulos de galaxias; habría, pues, que inventar una segunda partícula (o algún otro mecanismo) para explicar las anomalías de la dinámica de las galaxias que hoy se justifican apelando a la hipótesis de la materia oscura. Y ello no resulta estéticamente muy agradable.

Avances recientes de la física teórica pueden ofrecer una salida al dilema a través de un nuevo modelo de formación de macroestructuras, un modelo que combina características del modelo isotérmico con otras del modelo de neutrinos. El concepto, relativamente nuevo, de la supersimetría [véase “¿Es supersimétrica la naturaleza?” por Howard E. Haber y Gordon

L. Kane; INVESTIGACION Y CIENCIA; agosto de 1986] predice la existencia de ciertas partículas llamadas fotinos, gravitinos y axiones que podrían haberse creado en una fase muy temprana de la historia del universo. Estas partículas serían de masa mucho mayor que los neutrinos, de manera que no circularían libremente después de su desacople de la radiación de fondo. Serían más lentas y más frías. Las fluctuaciones de densidad podrían crecer entonces en instantes muy anteriores y en escalas mucho menores que en el modelo dominado por neutrinos. En el nuevo modelo, las galaxias se formarían primero y las macroestructuras evolucionarían a partir de fluctuaciones que se presentarían en un período posterior de la primitiva historia del universo. Debido a que las macroestructuras derivan de fluctuaciones tempranas, el lento proceso de agregación gravitacional no es la única fuente de formación de supercúmulos, tal como lo era en el modelo isotérmico. Este modelo, que se basa en partículas lentas, o frías, y en el que las galaxias se forman antes que los supercúmulos, pero en el que ambos surgen de fluctuaciones tempranas, se denomina modelo de partículas frías o modelo “abajo-arriba” híbrido.

A partir del modelo de partículas frías se establecen tres predicciones experimentales comprobables. Primero, las galaxias deben ser más viejas que los supercúmulos. Las interrelaciones entre las alineaciones de los supercúmulos y sus galaxias constituyentes no deben ser, por tanto, tan estrechas como en el modelo de neutrinos. Segundo, debido a que, en este modelo, el espectro de fluctuaciones de densidad prefiere las estructuras pequeñas a las grandes, estructuras enormes como el filamento Perseo-Pegaso no abundarán en el universo. Tercero, aunque los vacíos deben ser todavía relativamente desérticos, cabe esperar que contengan algo de materia, que provendría de materia no incluida en las fluctuaciones tardías que originaron los supercúmulos.

Batuski, Melott y el autor han emprendido el análisis comparativo de los méritos relativos del modelo isotérmico, el de neutrinos y el de partículas frías, simulando en un superordenador la distribución de cúmulos abundantes que se esperarían en cada uno de los tres. Los resultados provisionales del agrupamiento predicho por cada modelo con el encontrado realmente en los cúmulos de Abell no son muy alentadores. Ningún modelo reproduce la abundancia aparente de filamentación

de supercúmulos en escalas grandes. En particular, el modelo de neutrinos engendra demasiados supercúmulos pequeños y estrechos, amén de un excesivo número de galaxias; los modelos isotérmico y de partículas frías, por otro lado, proporcionan mucha menos estructura que la que se ve en los cúmulos de Abell. Estamos acometiendo modelaciones más generales dirigidas a confirmar y ampliar estas primeras conclusiones.

Las simulaciones que se han realizado hasta ahora abren una cuestión teórica no exenta de interés. ¿Qué sucederá si, concluidas esas simulaciones, ninguno de los modelos propuestos reproduce las macroestructuras que se han descubierto recientemente?

En tal caso, caben, en mi opinión, dos opciones alternativas. Primera, la distribución de materia luminosa, así galaxias y supercúmulos, podría no corresponderse muy bien con la distribución de materia oscura. De la materia oscura es de lo que el autor y sus colegas se ocupan en sus simulaciones, y la distribución de ésta podría ser mucho más homogénea que la relativamente compacta distribución de materia luminosa, que puede someterse a observación y representación directa.

La segunda opción alternativa sería que las perturbaciones de densidad se originaran a través de un mecanismo totalmente diferente del hasta ahora considerado. Quizá la formación de galaxias y cúmulos vino instada por cuerdas cósmicas: defectos largos y unidimensionales en la estructura del espacio-tiempo que producen una gravedad anormalmente intensa en las regiones donde forman bucles. Las teorías de “supercuerdas” —nuevas teorías de la física fundamental en las que las partículas no se contemplan como puntos sin dimensiones, sino como pequeñas cuerdas vibrantes unidimensionales— podrían tener implicaciones astrofísicas que aún no se han explorado en su integridad. En particular, podría suceder que las teorías de supercuerdas necesitaran alguna clase de “materia en penumbra” que se hubiera creado durante la era de la gravedad cuántica. La materia “en penumbra” interactuaría con la materia ordinaria sólo mediante la fuerza gravitatoria.

Paradojas y problemas que mantienen en vilo al físico teórico y al experimental. Vivimos momentos excitantes para la cosmología y física de partículas de alta energía, ya que de la conjunción de ambas disciplinas se espera hallar la respuesta a las cuestiones planteadas.

Anti-idiotipos e inmunidad

Los anticuerpos anti-idiotipos reconocen la individualidad molecular de otros anticuerpos. Modulan la respuesta inmunitaria y abren las puertas a una futura manipulación experimental y terapéutica del sistema inmunológico

Ronald C. Kennedy, Joseph L. Melnick y Gordon R. Dreesman

Nuestro sistema inmunitario elabora millones de anticuerpos diferentes. Anticuerpos son las complejas moléculas que reconocen a las sustancias extrañas que invaden el cuerpo, se unen a ellas y desencadenan el mecanismo para destruirlas. Cada anticuerpo, a su vez, puede ser blanco de otros anticuerpos que reconozcan sus características moleculares. Mediante esas reacciones entre anticuerpos, el sistema inmunitario interactúa consigo mismo. La respuesta inmunológica normal parece encontrarse regulada por una maraña de reacciones de ese tipo, de tal modo que cualquier alteración de la misma pueda originar una enfermedad de autoinmunidad, como la artritis reumatoide, el lupus eritematoso sistémico y la miastenia grave, dolencias que tienen su origen en un ataque inmunológico contra el propio cuerpo.

Los trabajos realizados en nuestro laboratorio, entre otros, han demostrado que podemos servirnos de esas interacciones, conocidas por reacciones idiotipo-anti-idiotipo, para manipular el sistema inmunitario. Posibilidad que abre importantes perspectivas en la terapia de diversas enfermedades, que van desde infecciones hasta enfermedades por autoinmunidad y muchos tipos de cáncer.

Las reacciones idiotipo-anti-idiotipo son el resultado de la diversidad y especificidad de los propios anticuerpos. Las inmunoglobulinas, clase de proteínas a la que pertenecen los anticuerpos, se fabrican en los leucocitos de la sangre denominados linfocitos *B*. La población de linfocitos *B* se halla dividida en muchos millones de clones diferentes, cada uno de los cuales consta de una o varias células que fabrican un único tipo de anticuerpo. Tal multiplicidad de clones implica que casi cualquier macromolécula pueda actuar de antígeno y desencadenar una respuesta inmunológica específica.

En circunstancias normales, las moléculas de anticuerpos se encuentran unidas a la membrana de las células *B*, a modo de receptores de superficie. Cuando uno de esos anticuerpos situados en la membrana encuentra el determinante antigénico apropiado (la porción del antígeno a la cual se une directamente el anticuerpo), el clon de células *B* se multiplica y da origen a una gran población de células plasmáticas. Estas excretan moléculas de anticuerpos libres, todas ellas específicas del mismo determinante antigénico. El anticuerpo se une al antígeno y pone en marcha un complejo proceso encaminado a su destrucción o neutralización. La mayoría de los antígenos, ya estén situados en la superficie de una célula foránea o no, contienen numerosos determinantes antigénicos, y por tanto estimulan la secreción de muchos anticuerpos distintos.

Las bases de la especificidad de los anticuerpos residen en uno de los extremos de las cadenas de aminoácidos que lo forman. Cada molécula de anticuerpo consta de cuatro cadenas de aminoácidos: dos pesadas, o largas, idénticas, flanqueadas por otras dos ligeras, o cortas, también idénticas. La mayor parte de esas cadenas corresponde a la región constante, cuya composición es similar en todos los anticuerpos que pertenecen a una misma clase. Existen cinco clases de cadenas pesadas y dos de cadenas ligeras. Cada cadena contiene también una región variable, cuya composición química y configuración es característica de cada clon de células *B*. En el extremo de los dos brazos de la molécula de anticuerpo, las regiones variables de una de las cadenas pesadas y otra ligera configuran el sitio de unión, que es por donde el anticuerpo interactúa con su determinante específico.

En la década de 1950 se demostró que las moléculas de inmunoglobulinas

también contenían determinantes antigénicos. Se inyectaron en animales experimentales proteínas de mieloma, que son inmunoglobulinas fabricadas en grandes cantidades y de forma espontánea por células *B* cancerosas; los animales respondieron elaborando anticuerpos que reaccionaban contra las proteínas de mieloma.

En 1963, y de forma independiente, Henry G. Kunkel y sus colaboradores, del Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, y Jacques Oudin, del Instituto Pasteur, obtuvieron idéntico resultado utilizando anticuerpos fabricados normalmente por células que habían sido estimuladas con un antígeno. En esos ensayos se expuso un animal experimental a un antígeno para que fabricase los correspondientes anticuerpos. Se aisló el anticuerpo (Ac-1) del suero del animal y se inyectó en otro, donde indujo la formación de un segundo anticuerpo (Ac-2). El Ac-2 se unía exclusivamente al Ac-1; no se enlazaba a ningún otro de los anticuerpos contra los que se sometió a prueba. Podía afirmarse, por tanto, que reconocía la individualidad del anticuerpo primario. A los determinantes antigénicos presentes en Ac-1, Oudin los denominó idiotipo (de las raíces griegas correspondientes a "individual" y "forma"). Para el Ac-2, producido en respuesta al idiotipo, acuñó el término anti-idiotipo.

Otros trabajos demostraron que el sistema inmunitario elaboraba más de un tipo de anticuerpo en respuesta a un Ac-1. Algunos, además de unirse al que los inducía, se unían también a anticuerpos que poseían la misma clase de cadenas pesadas y ligeras. Probablemente, esos segundos anticuerpos, que reciben el nombre de anti-isotipos, reconocen determinantes antigénicos presentes en las regiones constantes de las cadenas pesadas y ligeras. Otros anticuerpos, los anti-alotipos, reaccionan contra cualquier anticuerpo fabri-

cado por el individuo que elaboró el Ac-1, y no necesariamente contra anticuerpos procedentes de individuos distintos. Los alotipos contra los que responde este segundo tipo de anticuerpos son análogos a los antígenos de los grupos sanguíneos: todos los anticuerpos de un individuo presentan el mismo alotipo, pero éstos varían entre los miembros de una misma especie. Los determinantes que conforman un alotipo también se encuentran en las regiones constantes.

Por el contrario, se definió el anti-idiotipo como el anticuerpo capaz de reaccionar sólo contra el Ac-1 producido en respuesta a un solo antígeno. El idiotype debe residir, por tanto, en la región variable del Ac-1. A finales de los años 60 y principios de los 70, los estudios realizados por Alfred Nisonoff, actualmente en la Universidad de Brandeis, Klaus Eichmann, del Instituto Max Planck de Inmunología de Friburgo, y otros investigadores, ofrecieron una imagen más precisa de idiotipos y anti-idiotipos.

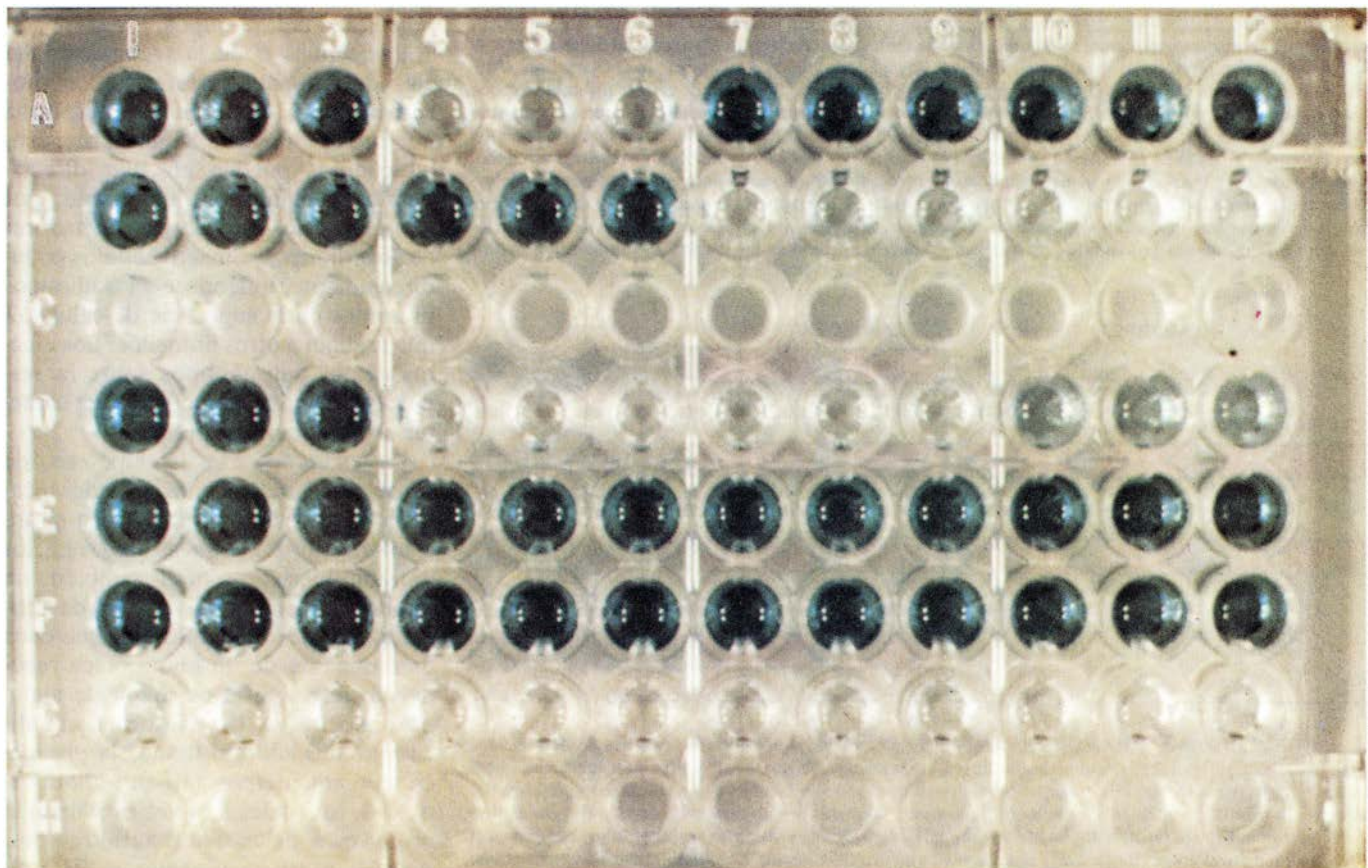
En algunos de esos trabajos se utili-

zaron como antígenos moléculas orgánicas sencillas o azúcares bacterianos, que desencadenaban la síntesis de un Ac-1; podía utilizarse éste para obtener un Ac-2 (el anti-idiotipo). Cuando se incubaba el Ac-1 con el antígeno, solía impedirse que el anti-idiotipo reaccionase con el idiotype. Lo que presumiblemente ocurría era que, al ocupar el sitio de unión del Ac-1, el antígeno bloqueaba la unión del anti-idiotipo. El idiotype, por tanto, debía residir en el sitio de unión o cerca de él.

Nuestros estudios demostraron que de la asociación entre idiotype y sitio de unión al antígeno podía deducirse una semejanza entre anti-idiotipo y antígeno. Cuando utilizamos como antígeno la hormona insulina, comprobamos que el anti-idiotipo resultante competía con la propia hormona por unirse a su receptor, señal de que el Ac-2 se parecía al antígeno. Podía aventurarse, por tanto, que el Ac-2 llevaba un "calco" del antígeno. No siempre ocurre así, pues la mayoría de los anti-idiotipos no mimetizan los efectos del antígeno original.

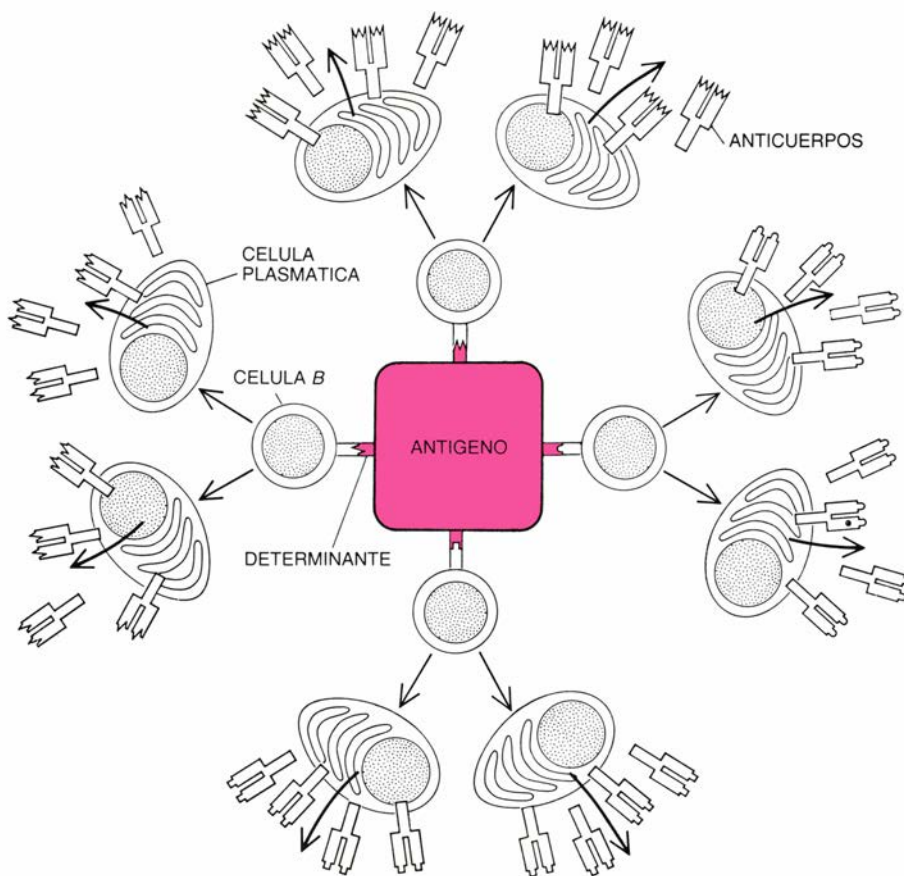
Es más, el idiotype no coincide en todos los casos con el sitio de unión. Si el Ac-1 se incubaba previamente con el antígeno, no siempre se impide la unión del anti-idiotipo. El sitio de unión de un anticuerpo está formado por una secuencia de aminoácidos que varía considerablemente entre unas moléculas de anticuerpo y otras. Esas secuencias tan variables se encuentran entremezcladas con otras regiones, menos variables, que podría entenderse que actúan de "sustentadoras" de todo el conjunto. Un Ac-2 que reconozca determinantes antigénicos presentes en esas regiones sustentadoras podría aún calificarse de anti-idiotipo, pues se une específicamente a un solo Ac-1. Pero puesto que no interactúa con el sitio de unión, no se inhibe si el antígeno está en ese sitio. Tal anti-idiotipo no guarda parecido con el antígeno.

En los estudios que establecieron los conceptos de idiotype y anti-idiotipo, los anticuerpos que se inyectaban en los animales de experimentación los habían generado organismos distintos.

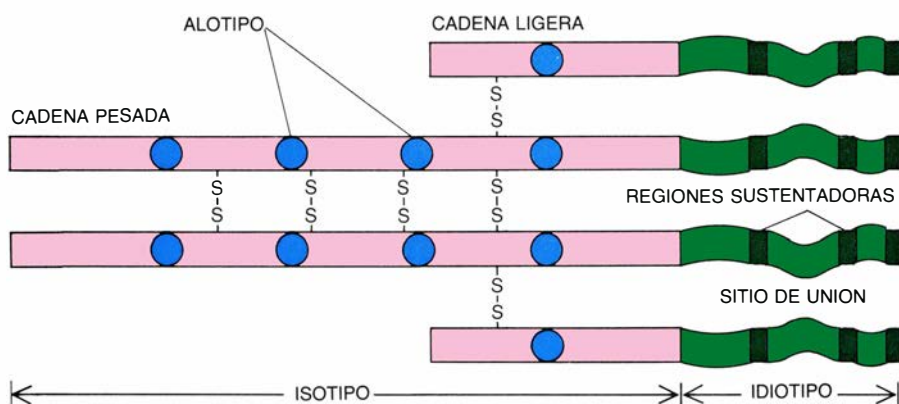


1. UNIÓN DEL ANTI-IDIOTIPO a su anticuerpo diana, puesta de manifiesto por la presencia de color verde en un ensayo inmunoenzimático (ELISA). Los pocillos de plástico se recubrieron con varias muestras de anticuerpos humanos y de ratón. A continuación se incubó en ellos un suero de conejo que contenía un anti-idiotipo contra anticuerpos humanos específicos del antígeno de la hepatitis B. Una vez lavados, los pocillos se expusieron a un anticuerpo anti-conejo

de cabra al que se le había unido previamente la enzima peroxidasa de rábano. Finalmente, se llenaron con una solución incolora que en presencia de la peroxidasa de rábano vira a verde. La presencia de color indica que el anticuerpo de cabra se ha unido, lo que a su vez señala la presencia de un anti-idiotipo. Así pues, las muestras de los pocillos de color verde contienen anticuerpos contra el antígeno de la hepatitis B, que constituyen las dianas del anti-idiotipo.



2. RESPUESTA DEL ANTICUERPO a un antígeno, o molécula foránea. Se produce cuando una serie de clones de células *B*, formados cada uno de ellos por uno o varios linfocitos (leucocitos sanguíneos) idénticos reconocen los determinantes antígenicos, que vienen a ser las señas de identidad superficial de los antígenos. Los receptores situados en las membranas de todos los clones de células *B* se unen a un determinante específico. De inmediato el clon empieza a multiplicarse y se forma una población de células plasmáticas, que excretan moléculas de anticuerpos libres. Las moléculas de anticuerpo, que tienen forma de Y, presentan dos sitios de unión, uno en cada brazo, dotados de la misma especificidad que presentaban los receptores del clon parental. A través de esos sitios de unión los anticuerpos se unen a otras moléculas del mismo antígeno, destruyéndolas en unos casos y neutralizándolas en otros. Puesto que cada antígeno porta muchos determinantes, abundan los clones de células *B* que intervienen en la respuesta inmunitaria. El diagrama que recoge la figura constituye una simplificación del proceso real. De hecho, para la producción de anticuerpos las células *B* requieren la ayuda de otros tipos celulares, entre ellos las células *T*, también leucocitos.



3. ESQUEMA DE UNA MOLECULA DE ANTICUERPO, donde se aprecian dos cadenas de aminoácidos pesadas, o largas, flanqueadas por otras dos ligeras, más cortas. Todas las cadenas poseen una región constante (rojo) y otra variable (verde). Las regiones constantes son similares en todos los anticuerpos pertenecientes a la misma clase. No obstante, los anticuerpos producidos por un determinado clon de células *B* se caracterizan porque presentan distintas regiones variables. La mayoría de los segmentos que componen el sitio de unión varía entre clones. Las regiones sustentadoras son menos variables. Todas las regiones que configuran el anticuerpo poseen determinantes antígenicos, capaces de estimular la producción de otros anticuerpos. Las regiones constantes llevan determinantes que son idénticos en todos los anticuerpos pertenecientes a la misma clase; constituyen un isotipo del anticuerpo. En las regiones constantes (y ocasionalmente en las variables) se encuentran determinantes idénticos en todos los anticuerpos de un individuo, si bien varían de unos individuos a otros. Constituyen un alotipo del anticuerpo. Los determinantes situados exclusivamente en las regiones variables, ya sea en el sitio de unión o en las regiones de armazón, se conocen por idiotipo. Los anticuerpos producidos por cada clon de células *B* tienen un idiotipo característico.

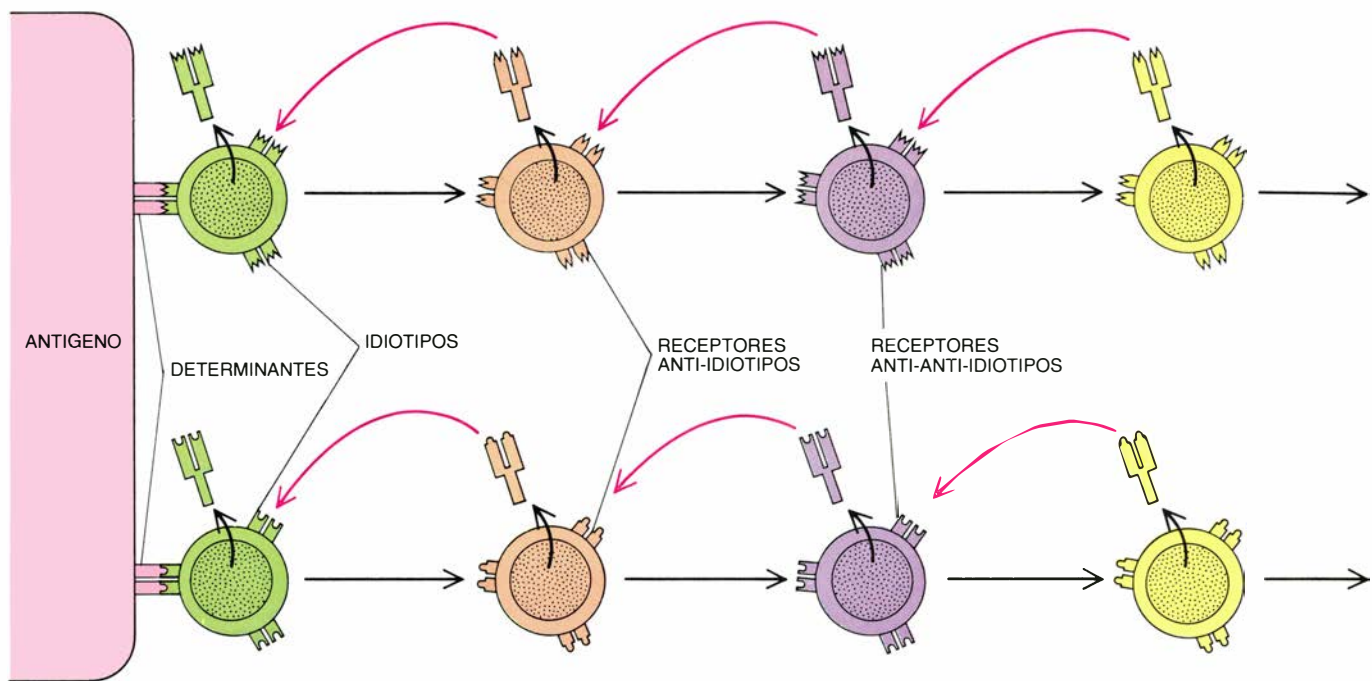
¿Se producen de manera natural en el propio sistema inmunitario ese mismo tipo de interacciones? A principios de los años 70, Niels Kaj Jerne, del Instituto de Inmunología de Basilea, propuso que así era. Según Jerne, la respuesta inmunológica está regulada por una red de idiotipos y anti-idiotipos. Sugirió que los anticuerpos y los receptores de superficie de las células *B* y *T* exhiben esos idiotipos. (Las células *T* son otros linfocitos, capaces de matar directamente las células y que desempeñan funciones reguladoras [véase "La célula *T* y su receptor", por Philippa Marrack y John Kappler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1986].) La proliferación de células *T* y *B* y el incremento de los niveles de anticuerpos, producidos en respuesta a un antígeno, conllevan también un incremento de la concentración de idiotipos.

El organismo suele tolerar las moléculas que él mismo fabrica, y no desencadena respuesta inmunológica contra ellas. Según Jerne, la concentración de los idiotipos es tan baja que no se desarrolla el mecanismo de tolerancia. El aumento de concentración de un idiotipo estimula la proliferación de otros conjuntos de linfocitos portadores de receptores anti-idiotipos.

Las células *B* de la segunda población de linfocitos secretan anticuerpos anti-idiotipos, que regulan la respuesta inmunológica inicial. Según Jerne, esos anticuerpos pueden efectuar directamente la regulación, uniéndose, por ejemplo, a los anticuerpos portadores de los idiotipos e inactivándolos o, indirectamente, uniéndose a los idiotipos presentes en la superficie de células *T* que regulan a otros linfocitos. Los efectos de los anti-idiotipos sobre la respuesta inmunitaria pueden tener carácter estimulador o supresor.

De acuerdo con la hipótesis de Jerne, las interacciones que desencadena un antígeno no acaban en el anti-idiotipo (Ac-2), pues, a su vez, los anti-idiotipos presentan también un idiotipo. La enorme diversidad de anticuerpos existente conlleva el que cada determinante de un idiotipo sea reconocido por el sitio de unión de algún otro anticuerpo. De esa forma, el anticuerpo anti-idiotipo induce la producción de anticuerpos anti-anti-idiotipos, o Ac-3, los cuales a su vez estimulan la producción de anti-anti-anti-idiotipos, o Ac-4, y así sucesivamente. El antígeno inicial desencadena, por tanto, una perturbación de grandes dimensiones en esa intrincada red molecular.

La primera prueba experimental de que en el sistema inmunitario quizás



4. RED DE IDIOTIPOS que regula la respuesta inmunitaria a un antígeno, según el esquema propuesto por Niels Kaj Jerne, del Instituto de Inmunología de Basilea, confirmado en descubrimientos recientes. Un antígeno estimula la proliferación de linfocitos específicos, que reconocen la presencia de determinantes en su superficie. Los receptores de superficie de las células, y los sitios de unión de los anticuerpos que secretan, llevan idiotipos, que a su vez provocan la expansión de una segunda población de linfocitos dotados de receptores anti-

idiotipos que interactúan con los idiotipos. Esas células también poseen idiotipos, que estimulan a una tercera población de linfocitos. Según Jerne, cualquier perturbación se propaga por toda la red de idiotipos, pues las interacciones se repiten indefinidamente. Se cree hoy que ese número es finito. Las interacciones también se producen a la inversa: cada población celular secreta anticuerpos anti-idiotipos que se unen a los idiotipos de los anticuerpos y poblaciones celulares precedentes (flechas de color) y modulan la respuesta inmunitaria.

operase una red de idiotipos se obtuvo en 1974. Leo S. Rodkey, actualmente en el Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Houston, expuso conejos a un antígeno y purificó el anticuerpo que sintetizaron en su respuesta (Ac-1). Dejó descansar el sistema inmunitario del animal durante 14 meses y al cabo inyectó Ac-1 en los ejemplares que lo habían fabricado. Utilizando un radioinmunoensayo trató de comprobar la presencia de algún Ac-2 en el suero del animal. Marcó el Ac-1 con yodo radiactivo y lo trató con una enzima que eliminaba la región efectora de las cadenas de inmunoglobulinas (una parte esencial de las regiones constantes) y dejaba intactas las regiones variables, portadoras del idiotipo. Mezcló ese Ac-1 con el suero y lo expuso a una inmunoglobulina de cabra que se unía a la región efectora de cualquier anticuerpo de conejo y provocaba su precipitación. El Ac-1 sería incapaz por sí solo de reaccionar con la inmunoglobulina de cabra, pues carecía de región efectora. Para que se observase precipitación, el Ac-1 debía estar unido a un anticuerpo intacto del suero de conejo.

La formación de un precipitado radiactivo indicaba que, en efecto, al Ac-1 se había unido otro anticuerpo. Para confirmar que ese anticuerpo era un anti-idiotipo, Rodkey incubó Ac-1

radiactivo con el antígeno original y repitió el ensayo. En esta ocasión, la inmunoglobulina de cabra precipitó mucho menos Ac-1, señal de que la diana del segundo anticuerpo era la región variable del Ac-1. Rodkey denominó auto-anti-idiotipo al Ac-2. Desde entonces, otros investigadores han demostrado que durante una respuesta inmunológica normal se secretan auto-anti-idiotipos.

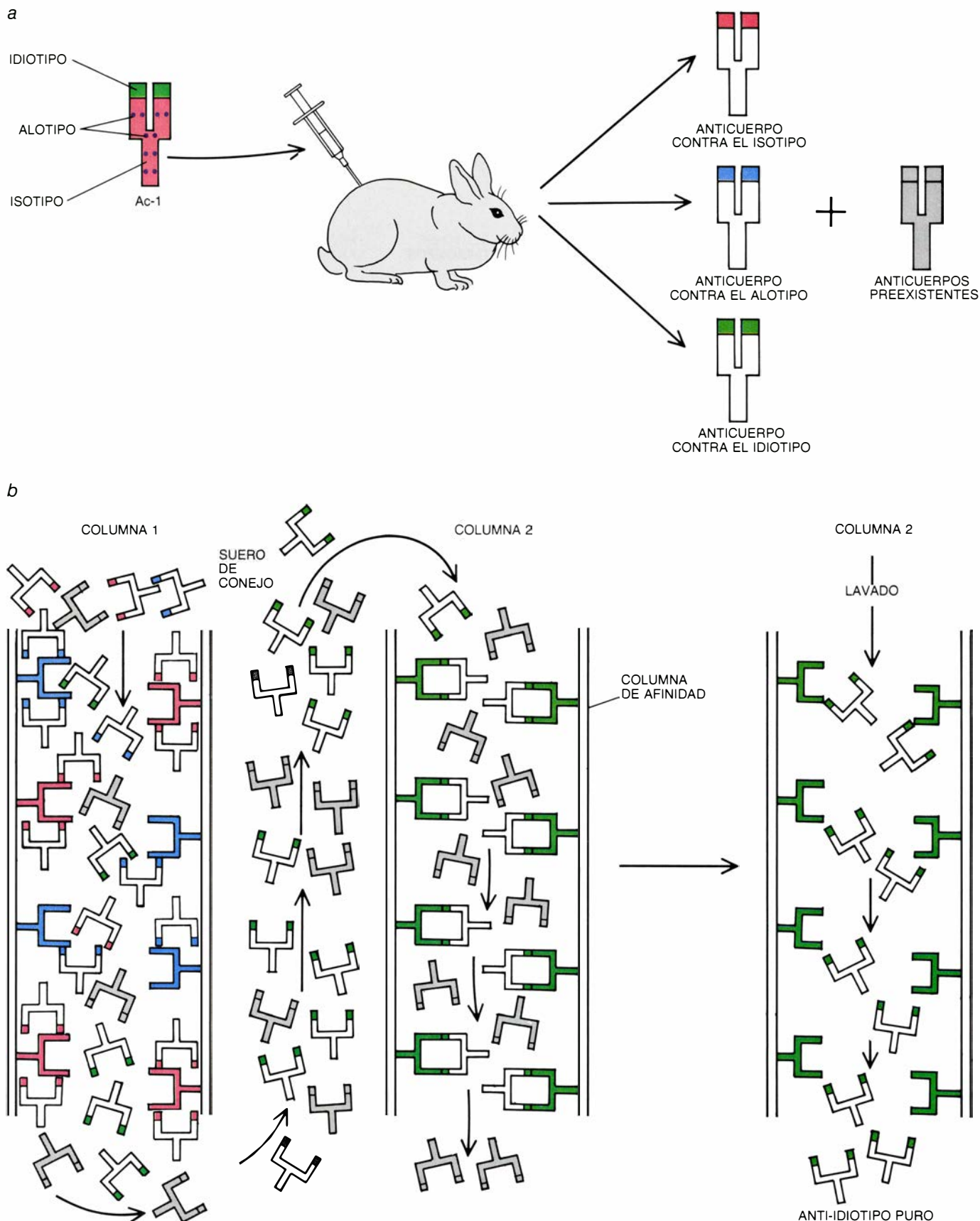
Constantin A. Bona, de la Facultad de Medicina Monte Sinaí, obtuvo una prueba más amplia de la existencia de una red de idiotipos en el ratón. Como Ac-1 se sirvió de un anticuerpo monoclonal (anticuerpo fabricado en cultivo por un único clon de células productoras de anticuerpos), específico de un azúcar bacteriano. Bona inyectó ese anticuerpo en ratones; obtuvo un Ac-2, que aisló y reinoculó en los animales. Recuperó un Ac-3 y, tras repetir el ciclo, también un Ac-4. Igual que otros habían demostrado que el Ac-2 puede mimetizar al antígeno, Bona encontró pautas de semejanza en su red de idiotipos. Razonó que los sitios de unión de Ac-4 y Ac-2 debían ser similares, ya que ambos reaccionaban con Ac-3. Lo mismo que Ac-2, Ac-4 debería unirse a Ac-1. En efecto, el 60 por ciento del Ac-4 de Bona se unía al Ac-1, el idiotipo inicial.

Otros investigadores han obtenido

pruebas de que la red de idiotipos abarca tanto a las células *T* como a las *B*, según había propuesto Jerne. En un experimento se le inyectaron a un animal células *T* producidas por otro ejemplar en respuesta a la presencia de un antígeno. Del suero del segundo animal se aislaron anticuerpos contra los idiotipos de los receptores de las células *T* que se inyectaron al primer animal, observándose una inhibición de la respuesta inmunológica. Puede que los anti-idiotipos logran ese efecto supresor uniéndose a los receptores de superficie de las células *T* encargadas de detener la respuesta inmunológica.

Nuestro grupo ha investigado las redes de idiotipos que se desarrollan en seres humanos infectados con virus de la hepatitis *B* (HBV). Nos instaron a ello razones de índole científica y práctica a la vez. El HBV provoca una grave infección primaria, y las infecciones crónicas a menudo determinan el desarrollo de otras enfermedades hepáticas, cáncer incluido. A nuestro entender, el conocimiento de las respuestas inmunológicas estimuladas por el virus nos descubriría estrategias inmunológicas que impiden la enfermedad.

Las células de hígado infectadas con HBV liberan grandes cantidades de proteínas de la cubierta vírica. Ese material, que es antigénico, se ha deno-



5. ELABORACION DE ANTI-IDIOTIPOS contra un anticuerpo humano específico del virus de la hepatitis B. El proceso comienza inyectándose el anticuerpo purificado (Ac-1) en un conejo (a). El suero extraído del conejo contiene anticuerpos preexistentes, anticuerpos contra el isotipo y el alotipo del anticuerpo humano y anti-idiotipos. Los anticuerpos no deseados se eliminan en columnas de afinidad, que contienen una matriz a la cual se le han unido otros anticuerpos (b). Una de las columnas se ha tratado con anticuerpos humanos

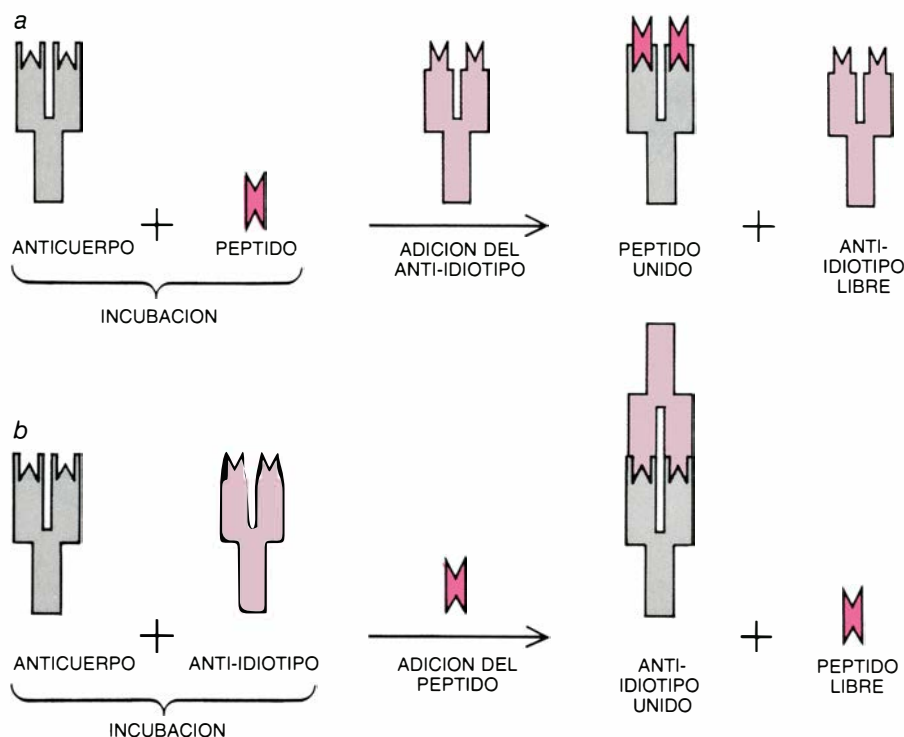
que llevan el mismo isotipo y alotipo (rojo y azul) que el Ac-1, pero diferente idiotipo. La segunda columna se ha tratado con Ac-1, el idiotipo original (verde). Al pasar el suero de conejo por la primera columna se eliminan los anticuerpos anti-isotipo y anti-alotipo, reteniéndose los anti-idiotipo y los preexistentes. Al pasar por la segunda columna se eliminan los anti-idiotipos, y se retienen sólo los preexistentes. Se lava entonces la segunda columna con un compuesto que libera el anticuerpo que ha quedado atrapado y se obtiene anti-idiotipo puro.

minado antígeno de superficie de la hepatitis B (HBsAg); contiene tres antígenos distintos, que se designan por letras. El antígeno *a* se encuentra en todas las estirpes de HBV. Los otros dos antígenos varían ajustándose a una pauta: en todas las cepas, los antígenos *d* o *y* se emparejan a los *w* o *r*. Los anticuerpos contra el antígeno *a* protegen contra reinfecciones de HBV de cualquier estirpe [véase "Hepatitis vírica", por Joseph L. Melnick, Gordon R. Dreesman y F. Blaine Hollinger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1977].

Nos preguntamos si los anticuerpos humanos producidos en respuesta a los HBsAg presentaban varios idiotipos, correspondientes a los sitios de unión capaces de reconocer los distintos antígenos. De ser ello así, se complicaría notablemente nuestro propósito de descubrir las reacciones idiotipo-anti-idiotipo instadas por la infección, reduciéndose a la par las posibilidades de someterlas a manipulación.

Conseguimos demostrar, sin embargo, que todos los anticuerpos humanos fabricados tras la exposición a los HBsAg por infección de hepatitis B o vacunación expresaban un idiotipo común. Inyectamos en conejos anticuerpos de un solo individuo; del suero de los conejos aislamos a continuación un anti-idiotipo. Contra el anti-idiotipo reaccionaban anticuerpos obtenidos de diversos individuos, señal de que todos ellos presentaban el mismo idiotipo. Comprobamos que el idiotipo lo inducía el antígeno *a*. Verificamos también la capacidad de los HBsAg de varias estirpes de virus para bloquear la reacción del anti-idiotipo con anticuerpos humanos. Todas las estirpes inhibían con la misma eficacia la reacción, lo que indicaba que el idiotipo se unía a un determinante antigénico compartido por todas las estirpes. Ese determinante debía residir en el antígeno *a*.

¿Disponía el anti-idiotipo de conejo de un calco del antígeno *a*? Es probable, pues el HBsAg impedía la unión del anti-idiotipo al Ac-1 humano. No obstante, el HBsAg es una macromolécula, por lo que, dada su magnitud, puede provocar el bloqueo estérico de las reacciones anti-idiotipo aun cuando el anti-idiotipo reaccione con una de las regiones sustentadoras del Ac-1 y no con el sitio de unión. De ahí que sometieramos a ensayo una molécula mucho menor, un péptido sintético (una secuencia breve de aminoácidos) que simulaba uno de los determinantes del antígeno *a*. Comprobamos que también éste inhibía la unión del anti-idiotipo.



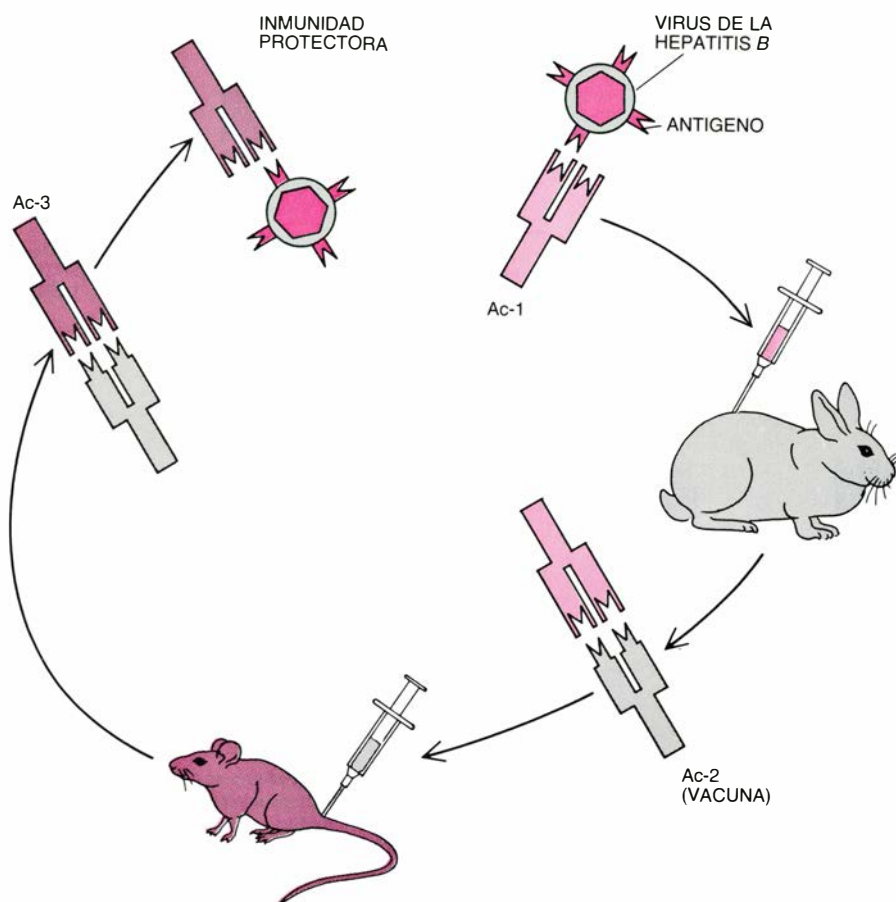
6. EQUIVALENCIA entre el antígeno de superficie de la hepatitis B (HBsAg) y un anti-idiotipo fabricado tras inyectar anticuerpos humanos contra la hepatitis B en conejos, según demostraron los autores. Cuando se incubaba otra preparación del anticuerpo humano con un péptido sintético (una breve cadena de aminoácidos) que mimetiza a un determinante antigénico fundamental del HBsAg, el anti-idiotipo ya no puede reaccionar con el anticuerpo (a), lo que sugiere que el idiotipo ocupa el sitio de unión del anticuerpo. Y a la inversa, la incubación con el anti-idiotipo impide que el anticuerpo humano reaccione con el péptido (b). Puesto que anti-idiotipo y antígeno interactúan con el mismo sitio del anticuerpo anti-hepatitis, los resultados sugieren que el sitio de unión del anti-idiotipo podría estar estructurado de forma similar al antígeno. Por tanto, el anti-idiotipo quizá disponga de un "calco" del antígeno. Los dibujos son de Alan D. Iselin.

Observaciones de otro tenor sugieren igualmente que el anti-idiotipo de conejo mimetiza la forma del antígeno de la hepatitis B. Aunque tengan en común la forma del sitio de unión, las características bioquímicas de los anticuerpos que reconocen un mismo antígeno pero los han fabricado especies distintas pueden diferir. Cabe, por tanto, que un anti-idiotipo reaccione sólo con el Ac-1 de una de las especies porque reconozca específicamente la composición química de su región variable y no la forma de su sitio de unión. Pero lo que nuestro grupo observó, fue que la preparación de conejo se unía a Ac-1 producidos por ratones, chimpancés y otras cinco especies de mamíferos, además del hombre. Resultaba evidente, pues, que tanto el anti-idiotipo como el propio antígeno de la hepatitis B reconocían específicamente la forma del sitio de unión del Ac-1.

¿Podría el anti-idiotipo de conejo hacer las veces de la vacuna de la hepatitis B convencional, que fundamentalmente es el HBsAg? Nisonoff y Edmundo Lamoyi, hoy en el Instituto Nacional estadounidense de la Alergia

y Enfermedades Infecciosas, e, independientemente, Ivan M. Roitt y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina del Hospital Middlesex de Londres, avanzaron la idea de que un idiotipo pudiera servir de vacuna contra un agente infeccioso. Parecían confirmar esa hipótesis los resultados obtenidos por Jeffrey Bluestone y David H. Sachs, del Instituto Nacional del Cáncer, en estudios de rechazos de injertos de piel. El rechazo de tejidos foráneos débese a que el sistema inmunitario reconoce la presencia, en las membranas de las células foráneas, de las proteínas denominadas antígenos de histocompatibilidad. Bluestone y Sachs aislaron anticuerpos contra esos antígenos de histocompatibilidad a partir del suero de ratones que habían recibido transplantas de piel, y con esos anticuerpos generaron un anti-idiotipo en otras especies.

Al inocular ese anti-idiotipo en ratones que no habían sido expuestos a tejidos foráneos, los animales fabricaban anticuerpos capaces de unirse a los antígenos de histocompatibilidad. Apparentemente, por tanto, la preparación del anti-idiotipo contenía un calco de los antígenos de histocompatibilidad.



7. LA VACUNA ANTI-IDIOTIPO contra la hepatitis B se vale de un calco del antígeno vírico para ejercer su función. Se le inyecta anticuerpo humano contra el antígeno (Ac-1) a un conejo, que fabrica un anti-idiotipo (Ac-2), y éste se inyecta a un ratón o chimpancé, que a su vez elabora anticuerpos contra el anti-idiotipo (Ac-3). Aunque difieran en sus características bioquímicas, el tercer anticuerpo se parece estructuralmente al primero, gracias a la semejanza entre antígeno de la hepatitis y anti-idiotipo. Tal similitud permite que el Ac-3 reaccione contra el antígeno y proteja de la infección a un animal vulnerable, como es el chimpancé.

Ese calco, contenido en el Ac-2, estimuló sin duda al sistema inmunitario a fabricar un Ac-3 de especificidad similar a la de un Ac-1.

En otra serie de estudios, enmarcados también en la utilización de los anti-idiotipos como vacunas, David L. Sacks, del Instituto Nacional de la Alergia y Enfermedades Infecciosas, inyectó en ratones un Ac-1 monoclonal específico de un antígeno de superficie de *Trypanosoma*, protozoo que produce en el hombre la enfermedad del sueño. Los ratones a los que se les administró el correspondiente anti-idiotipo quedaron protegidos contra una dosis de *Trypanosoma* que en circunstancias normales hubiera sido letal. En estudios posteriores se comprobó, sin embargo, que la protección del anti-idiotipo se daba sólo si el ratón que lo producía estaba estrechamente emparentado con el que había fabricado el Ac-1 monoclonal.

La existencia de tal restricción genética manifestaba que el anti-idiotipo no contenía el calco del antígeno, pues, si así fuese, habría estimulado la elab-

oración de anticuerpos por parte del sistema inmunológico de cualquier ratón. Probablemente el idiotipo inductor del Ac-2 estaba asociado con porciones de la región variable cuya composición difería en ratones genéticamente distintos, y ello aunque los anticuerpos fuesen equivalentes. Así, sólo en una estirpe consanguínea del ratón que elaboraba el Ac-1 podría el anti-idiotipo inducir un Ac-3 protector, idéntico al Ac-1 monoclonal en su especificidad antigénica. (Recientemente, Sacks y sus colaboradores han logrado fabricar un anti-idiotipo que parece portar un calco de un antígeno de *Trypanosoma* sin estar sujeto al fenómeno de restricción genética.)

Como primer paso para determinar si nuestro anti-idiotipo servía de vacuna contra la hepatitis B, investigamos el efecto del pretratamiento con el anti-idiotipo sobre la consiguiente respuesta inmunológica al HBsAg. Para ello, inyectamos a grupos de ratones nuestro anti-idiotipo de conejo o, en los controles, una preparación de in-

munoglobulinas inespecíficas de conejo. A continuación, expusimos los animales al HBsAg y analizamos los anticuerpos producidos, mediante un ensayo hemolítico. Las células B procedentes de los bazo de los ratones se situaron sobre capas de eritrocitos de oveja precubiertos con HBsAg. Seguidamente se añadió el complemento, un sistema de proteínas sanguíneas que provoca la rotura de las células que llevan unido el anticuerpo. La aparición de zonas claras (las placas) señaló la destrucción de los eritrocitos en la proximidad de las células B que sintetizaban anticuerpos.

Con agradable sorpresa, comprobamos que las placas que aparecían alrededor de las células de bazo procedentes de ratones que habían sido pretratados con el anti-idiotipo eran más numerosas que las formadas alrededor de las células de ratones control. Parecía, por tanto, que el pretratamiento había alentado la respuesta inmunológica posterior. Detectamos también secreción de anticuerpos en células procedentes de un grupo de ratones que sólo había recibido el anti-idiotipo, sin la inyección posterior de HBsAg. Una prueba independiente, en la que se sometió a ensayo el suero del ratón, y no las células de bazo, confirmó que el anti-idiotipo inducía por sí mismo la elaboración de anticuerpos capaces de reaccionar contra el antígeno vírico.

¿Equivalen los anticuerpos Ac-3 inducidos por el anti-idiotipo (Ac-2) a los que se forman durante una infección natural por HBV? Esos anticuerpos reconocen el antígeno *a*, que es común a todas las estirpes del virus. Para comprobar si los anticuerpos inducidos por el anti-idiotipo reaccionaban también con el antígeno *a*, aislamos el Ac-3. Con ese fin hicimos pasar el suero de los ratones tratados a través de una columna revestida con HBsAg y, a continuación, extrajimos el Ac-3 de la columna. Seguidamente analizamos la capacidad de los HBsAg de varias estirpes víricas para inhibir la unión del Ac-3 con el Ac-2. En todos los casos se inhibió el enlace, prueba de que el sitio de unión del Ac-3, al igual que el Ac-1 humano, reconocía al antígeno *a*. Comparamos directamente el Ac-3 de ratón con el Ac-1 humano haciéndolos competir por la unión con el Ac-2 de conejo. El anticuerpo humano, que protege contra el HBV, y nuestro Ac-3 de ratón experimental se unían al anti-idiotipo con pareja eficacia.

Venían a sugerirnos esos hallazgos que el Ac-3 inducido por el anti-idiotipo podría conferir inmunidad protec-

tora frente a la hepatitis B. Sin embargo, para comprobar el potencial del anti-idiotipo de conejo como vacuna de la hepatitis humana, necesitábamos un animal que sirviera de modelo. Aunque los ratones respondan produciendo anticuerpos cuando se les inyecta HBsAg, en realidad el HBV no les provoca la enfermedad. El chimpancé sí padece la hepatitis B, por lo que resulta una especie apropiada para ensayar una vacuna contra el agente patógeno.

En colaboración con Jorg W. Eichberg y Robert E. Lanford, de la Fundación Southwest de Investigaciones Biomédicas, inyectamos el anti-idiotipo de conejo a dos chimpancés y a otros dos les inoculamos una preparación control de inmunoglobulina inespecífica. A los cuatro animales se les puso en contacto con el HBV infeccioso. El suero de los chimpancés utilizados de control presentaba niveles elevados de enzimas hepáticas y otros marcadores relacionados con la infección. Los animales que habían recibido el anti-idiotipo no presentaban ningún signo de enfermedad.

Nuestros trabajos con los chimpancés constituyen, hasta la fecha, la demostración más directa del potencial de los anti-idiotipos como vacuna. Existen indicios de que los anti-idiotipos podrían vacunar contra otras enfermedades. Se ha demostrado que el pretratamiento con anti-idiotipos protege a los ratones parcial o completamente contra varios agentes infecciosos, como son el virus Sendai y los reovirus (que provocan infecciones leves del cerebro), el virus de la rabia, el del herpes simplex, los poliovirus y varias bacterias y protozoos patógenos.

Son numerosas las ventajas que conferiría la utilización en el hombre de las vacunas de anti-idiotipos. Las vacunas actuales se obtienen del propio agente infeccioso, muerto o atenuado, así como de antígenos purificados. En muchos antígenos, pensemos en el propio HBsAg, la purificación resulta difícil, si bien algunos antígenos proteicos pueden ya fabricarse mediante técnicas de ADN recombinante. Los componentes antigénicos de muchas bacterias y protozoos, no obstante, constan de carbohidratos o grasas, que no se prestan a síntesis artificial o por técnicas de ADN recombinante. No siempre interesa la otra opción, a saber, administrar el patógeno, pues a veces los organismos atenuados recobran su virulencia. Las técnicas de anticuerpos monoclonales facilitarían la obtención de vacunas de anti-idiotipos, que no pro-

vocarían la enfermedad para cuya prevención se diseñan.

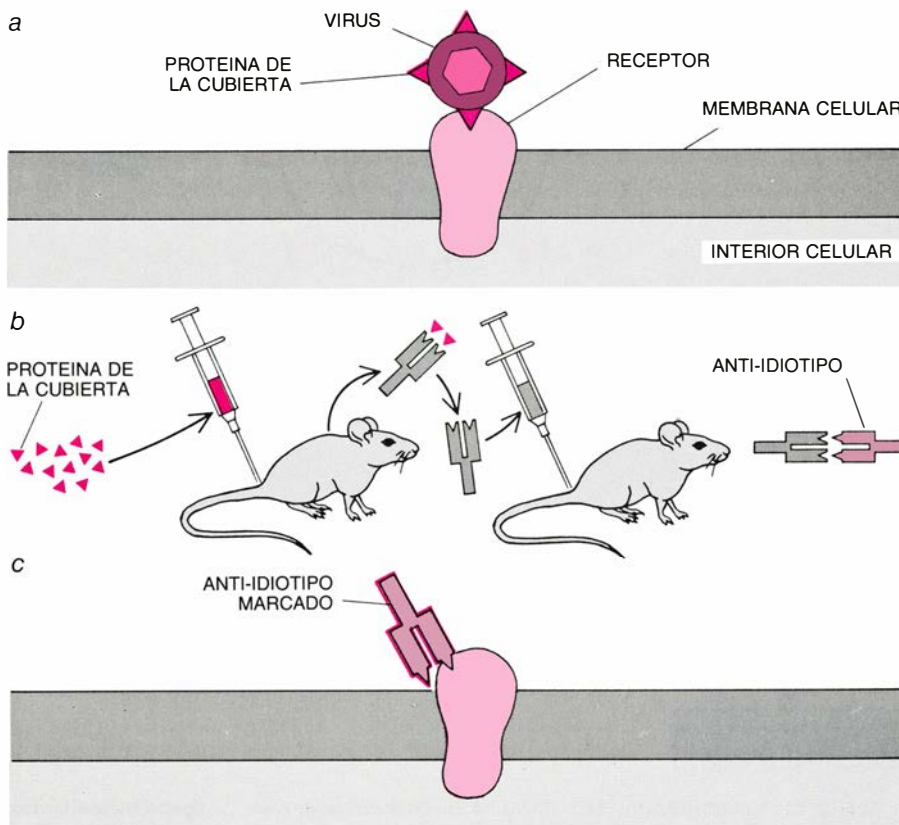
Su especificidad constituye otro factor importante a tener en cuenta. Los anti-idiotipos sólo desencadenan la síntesis de anticuerpos dirigidos contra un determinante antigénico, el que corresponde al calco del que son portadores. Por el contrario, los agentes infecciosos atenuados pueden presentar gran número de determinantes antigénicos, además del que induce la inmunidad. Algunos de esos determinantes quizá se parezcan a otros propios de algún tejido del cuerpo, lo que podría provocar una respuesta de autoinmunidad.

Las vacunas de anti-idiotipos resultarían particularmente valiosas para los recién nacidos, cuyo sistema inmunitario, inmaduro aún, no puede fabricar anticuerpos contra ciertos componentes (azúcares) de las paredes de algunas bacterias patógenas. Las vacunas tradicionales contra las bacterias no son eficaces en recién nacidos. Un anti-idiotipo mimetizaría la estructura del componente de la pared; mas, por tratarse de una proteína, sí desencadenaría la respuesta inmunitaria. La efecti-

vidad de los anti-idiotipos como vacunas se ha demostrado ya en animales experimentales recién nacidos.

Algunos factores podrían limitar el uso de los anti-idiotipos como vacunas humanas. La inyección de suero con un anti-idiotipo fabricado en otro animal, por ejemplo el conejo, podría causar fiebre y reacciones alérgicas en algunas personas. Además, dada la complejidad de la red de idiotipos, el efecto del anti-idiotipo podría resultar en ocasiones lesivo. Muchos anti-idiotipos parecen provocar una respuesta equivalente a la que desencadena el propio antígeno. Otros, sin embargo, quizá ejerzan los efectos supresores del sistema inmunitario postulados por Jerne. Hemos advertido que la administración de un anti-idiotipo fabricado contra un anticuerpo monoclonal de ratón, específico del virus herpes simplex, acortaba significativamente la supervivencia de los ratones infectados posteriormente con el virus.

La eficacia de los anti-idiotipos quizás abarque también al cáncer, ya utilizados como vacuna, ya en su tra-



8. SEÑALAN LOS ANTI-IDIO TIPOS el punto de ataque vírico a una célula. Para que un virus infecte a una célula, parte de su envoltura proteica debe unirse a un receptor, una proteína complementaria situada en la superficie celular (a). Se inyecta la proteína vírica en un animal experimental, para fabricar anticuerpos que a su vez inducirán un anti-idiotipo al inocularlas en otro animal (b). Si el anti-idiotipo porta un calco del antígeno original (la proteína vírica), podrá unirse al receptor de la superficie celular (c). El anti-idiotipo se marca con una sustancia fluorescente o electrodensa, de manera que pueda identificarse su diana, situada en la superficie celular, al microscopio óptico o electrónico. Esa estrategia resulta especialmente adecuada para identificar un receptor de superficie cuando cuesta aislar el propio virus para utilizarlo como sonda.

tamiento. Los cánceres que afectan al sistema inmunológico pueden derivar de un solo clon de células *B* o *T*. En ese tipo de cánceres, todas las células expresan en su superficie el mismo idiotipo. En teoría, el anti-idiotipo pertinente eliminaría todas las células tumorales sin afectar a los tejidos normales. Ronald Levy y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, utilizaron anti-idiotipos específicos, producidos en ratones, para tratar a pacientes que padecían linfomas de células *B*. En uno de ellos la enfermedad ha remitido totalmente desde hace cinco años, mientras que en la mitad de ellos, aproximadamente, las respuestas clínicas han sido significativas. No obstante, estudios recientes del grupo de Levy y de Jeffrey Cossman y sus colaboradores,

del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, indican que durante el tratamiento con anti-idiotipos pueden aparecer otras células malignas que expresan un idiotipo diferente. Para acabar con todas las variantes celulares habría que administrar muchos anti-idiotipos distintos.

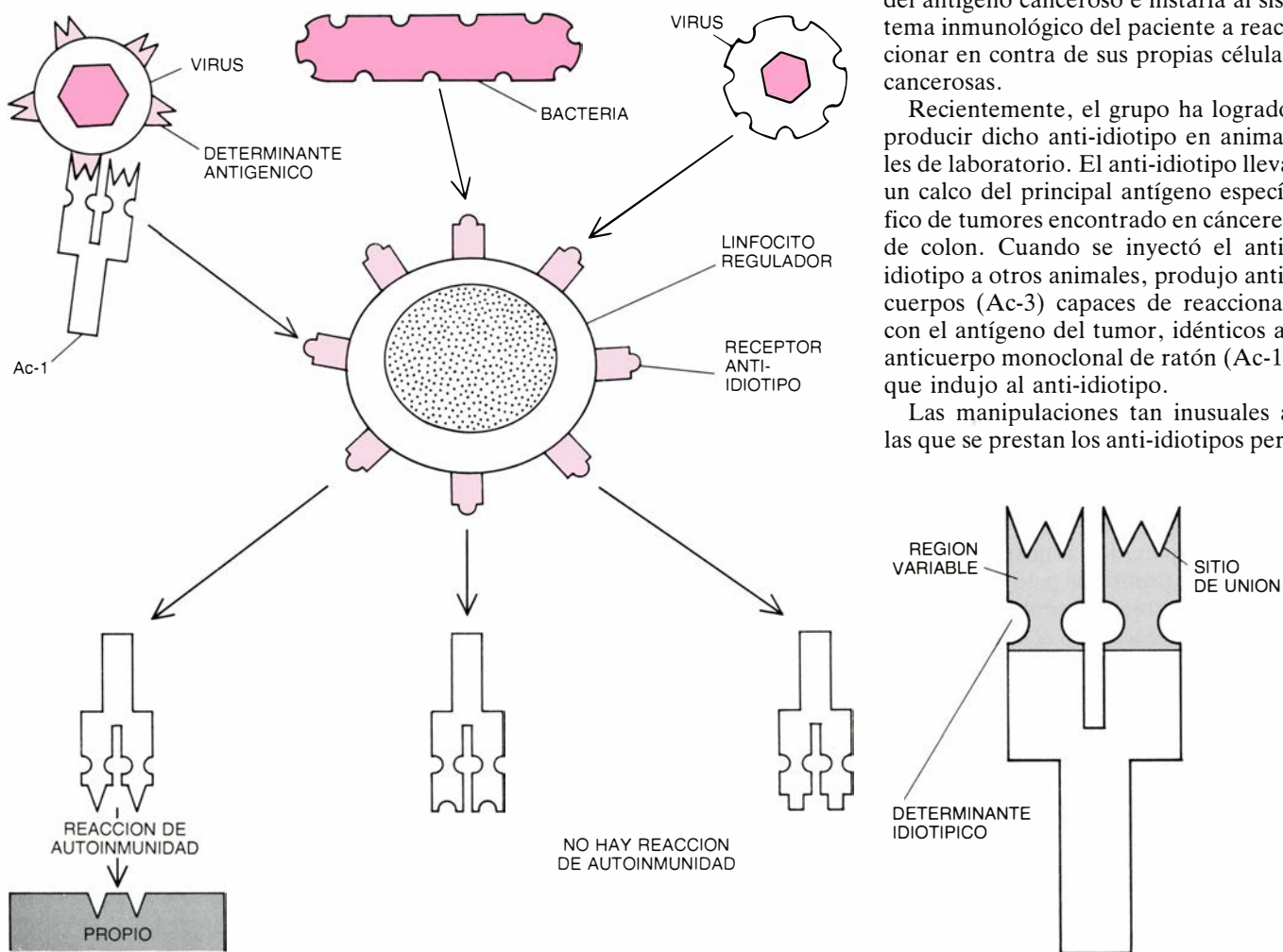
Keith A. Krolick, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en San Antonio, y Ellen S. Vitetta y Jonathan W. Uhr, del mismo centro en Dallas, se sirvieron de una estrategia diferente para el tratamiento del cáncer con anti-idiotipos. Unieron al anti-idiotipo una ricina, una toxina vegetal, y encontraron que esa combinación destruía, en cultivo, una población de células *B* leucémicas de ratón. Al unirse el anti-idiotipo a los receptores de superficie de las células *B*, las moléculas de toxina aca-

baban específicamente con las células cancerosas. Cuando repitieron el experimento con ratones vivos afectados con leucemia de células *B* observaron una disminución del crecimiento del cáncer.

Otra posibilidad, en la lucha contra el cáncer, sería movilizar los anti-idiotipos del propio organismo. En un estudio realizado por Dorothee Herlyn e Hilary Koprowsky, del Instituto Wistar de Anatomía y Biología, se comprobó una mejoría en pacientes con cánceres de colon y de recto que habían recibido tratamiento con un anticuerpo monoclonal de ratón contra un determinante antigénico de la superficie de las células malignas. Muchos pacientes fabricaron anti-idiotipos contra el anticuerpo de ratón. Según Koprowsky, el anti-idiotipo sería portador de un calco del antígeno canceroso e instaría al sistema inmunológico del paciente a reaccionar en contra de sus propias células cancerosas.

Recientemente, el grupo ha logrado producir dicho anti-idiotipo en animales de laboratorio. El anti-idiotipo lleva un calco del principal antígeno específico de tumores encontrado en cánceres de colon. Cuando se inyectó el anti-idiotipo a otros animales, produjo anticuerpos (Ac-3) capaces de reaccionar con el antígeno del tumor, idénticos al anticuerpo monoclonal de ratón (Ac-1) que indujo al anti-idiotipo.

Las manipulaciones tan inusuales a las que se prestan los anti-idiotipos per-



9. ALGUNAS ENFERMEDADES AUTOINMUNES podrían derivar de reacciones idiotipo-anti-idiotipo. Uno de los mecanismos propuestos se basa en que, como se muestra a la derecha, un anticuerpo porte determinantes idiotípicos que no estén situados en su sitio de unión. Tal anticuerpo, producido en respuesta a una bacteria o un virus (arriba, a la izquierda) estimularía el desarrollo de una población de linfocitos reguladores portadores de receptores anti-idiotipos que no mimeticen el antígeno original. También pudiera ser que la estimulación de los linfocitos reguladores no respondiera al anticuerpo contra el patógeno, sino al propio patógeno, esto es, a un determinante superficial que semejara un idio-

tipo del huésped (arriba, en el centro, y derecha). Las células reguladoras pueden, entonces, inducir la producción de una nueva serie de anticuerpos (abajo). Puesto que el determinante idiotípico no guarda relación con los sitios de unión de los anticuerpos donde se encuentra, los nuevos anticuerpos no tienen por qué guardar similitud funcional con el anticuerpo original, y pueden presentar especificidades muy distintas. Si la diana de los anticuerpos es un tejido del hospedador, se produce una reacción de autoinmunidad. Datos provisionales sugieren la posibilidad de que ese mecanismo llegue a provocar la artritis reumatoide y el lupus eritematoso sistémico, dos enfermedades por autoinmunidad.

miten utilizarlos también para investigar los mecanismos patogénicos. Por ejemplo, han servido para indicar con precisión el lugar de la superficie celular que usa un virus para infectar una célula. Los anti-idiotipos de los anticuerpos que reconocen la porción de la proteína del virus que se adhiere a la superficie celular pueden mimetizar a esa importante molécula de la cubierta externa del virus. Los anti-idiotipos, por tanto, pueden localizar el correspondiente receptor de la superficie celular y unirse a él. Mark I. Greene y Bernard N. Fields, actualmente en la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania y en la Facultad de Medicina de Harvard, respectivamente, recurrieron a esa estrategia para identificar los receptores de los reovirus presentes en la superficie de las neuronas y de las células del sistema inmunitario. Igual metodología ha permitido a nuestro grupo identificar al probable receptor del HBV en las células hepáticas.

Los resultados obtenidos en los estudios sobre anti-idiotipos sugieren la posibilidad de que las reacciones idiотipo-anti-idiotipo desencadenen, por sí mismas, algunas enfermedades de autoinmunidad, como la miastenia grave, trastorno en el que los músculos sufren de una fatiga y debilidad extremas. Los síntomas reflejan un ataque inmunológico contra el receptor de la acetilcolina; esta molécula, situada en la superficie celular, permite a los músculos recibir las señales químicas emitidas por los nervios.

Bernard F. Erlanger, Norbert H. Wassermann y sus colaboradores, de la Universidad de Columbia, decidieron averiguar cómo se producía dicho ataque inmunológico. Prepararon anticuerpos contra una sustancia que se une al receptor de la acetilcolina y los inyectaron en otros conejos, para obtener el correspondiente anti-idiotipo. Este parecía disponer del calco correspondiente a una parte fundamental de la sustancia contra la que se prepararon los anticuerpos, pues era capaz de unirse al receptor de la acetilcolina del conejo y, al hacerlo, provocaba los síntomas de la miastenia grave en los animales. Recientemente, W. L. Cleveland, de la Universidad de Columbia, junto con Erlanger y Wassermann, han logrado inducir la enfermedad en ratones, inyectándoles células que secretaban un anti-idiotipo monoclonal similar.

Así pues, en la miastenia grave un

anti-idiotipo, inducido por el propio cuerpo, puede reaccionar con el receptor de la acetilcolina, bloqueándolo o destruyéndolo. En la enfermedad de Graves, un trastorno autoinmunitario caracterizado por un desarrollo anormal de la glándula tiroides, un anti-idiotipo desencadena el efecto contrario. Se ha inducido la enfermedad en animales experimentales administrándoles un anti-idiotipo fabricado contra anticuerpos específicos de la tirotrópina, hormona que estimula el desarrollo de la tiroides. Probablemente el anti-idiotipo actuó como si se tratara de la hormona, uniéndose a su correspondiente receptor y estimulando el desarrollo de la tiroides. De producirse espontáneamente, esas mismas interacciones podrían causar la enfermedad en el hombre.

Existen también indicios de la participación de anti-idiotipos en otras dos enfermedades autoinmunitarias, la artritis reumatoide y el lupus eritematoso sistémico, enfermedad esta última del tejido conjuntivo. Característica de ambas patologías, y quizás un aspecto fundamental de sus mecanismos, es la presencia en el suero de anticuerpos muy especiales: factores reumatoides (anticuerpos contra un segmento de la molécula de inmunoglobulina), en la artritis reumatoide, y anticuerpos anti-ADN, en el lupus eritematoso sistémico. Se ha demostrado que esos anticuerpos expresan un idiотipo común en todas las víctimas, lo que sugiere que interactúan con un único anti-idiotipo. No sería de extrañar que el anti-idiotipo participara en el inicio de la enfermedad estimulando la producción de los anticuerpos.

Se ha visto, por tanto, que las reacciones idiотipo-anti-idiotipo abren las puertas al desarrollo de enfermedades complejas y poco comunes. Igualmente, hacen verosímil la posibilidad de intervenir, ya sea de forma preventiva o terapéutica, en el sistema inmunitario. La manipulación de dicho sistema con anti-idiotipos, para prevenir ciertas infecciones y para tratar algunos tipos de cáncer, parece ahora al alcance de la mano. El conocimiento más profundo de las reacciones idiотipo-anti-idiotipo permitirá curar enfermedades del propio sistema inmunitario. No es descabellado especular con la posibilidad de que un anti-idiotipo sirva, en el futuro, de vacuna o agente terapéutico para otra enfermedad, muy distinta y que también afecta al sistema inmunitario: el SIDA.

Ciencia y sociedad

El corazón del asunto

En su informe final, la comisión presidencial encargada de investigar la explosión sufrida por la lanzadera espacial *Challenger* descubre el error de diseño que provocó el accidente y describe pormenorizadamente los acontecimientos que condujeron a la tragedia. No aborda por qué la Administración Nacional estadounidense de Aeronáutica y del Espacio (NASA) permitió que se ignorase la existencia de graves peligros. Uno de los miembros de la comisión, Richard P. Feynman, del Instituto de Tecnología de California, plantea esa cuestión en un documento separado, donde considera que los errores de juicio y ejecución sacados a la luz por el equipo investigador constituyen síntomas que habrán de permitir el diagnóstico de los problemas, de mayor trascendencia, que aquejan al organismo espacial.

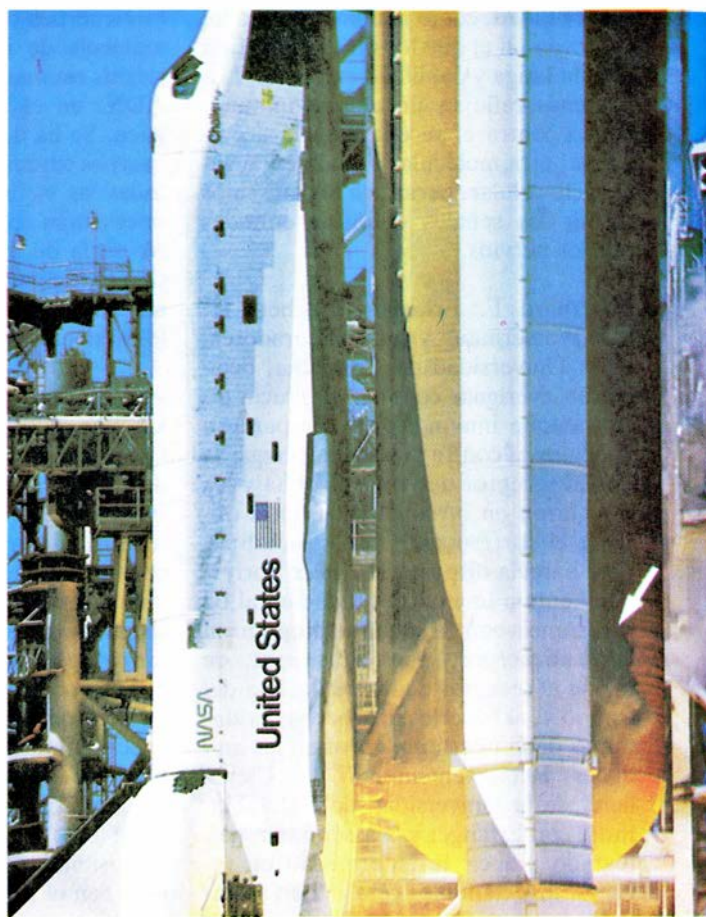
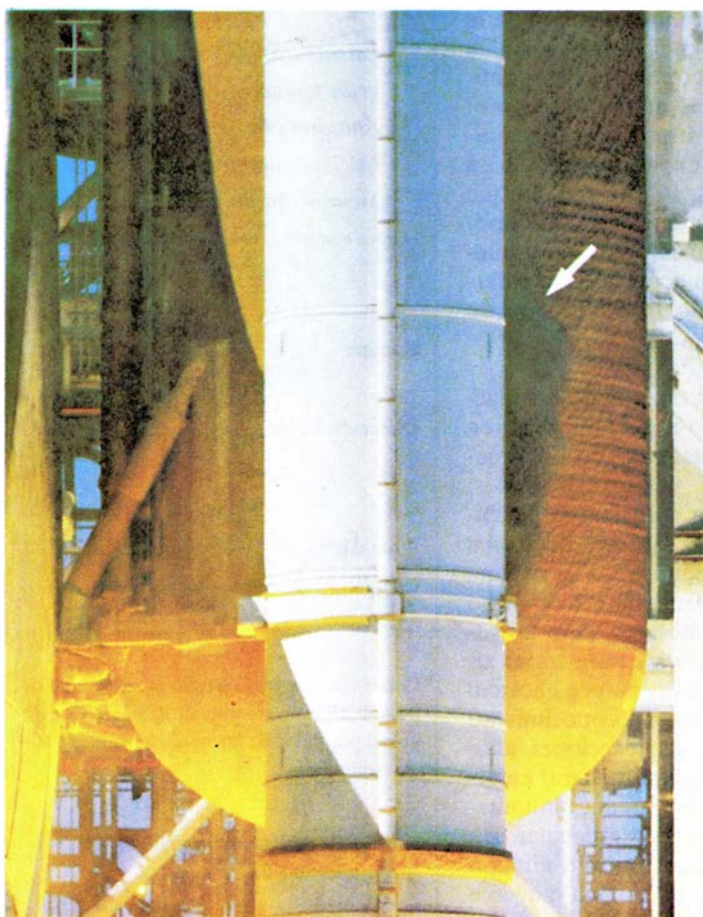
Viene a concluir que la eficacia de la NASA a la hora de vender su proyecto al Congreso norteamericano ha enmascarado sus posibilidades reales en el campo de la ciencia y la ingeniería.

Es del dominio público que la causa próxima del accidente residió en los defectos que presentaba uno de los anillos de la junta de aislamiento de las secciones del cohete de lanzamiento, de combustible sólido, situado en el lado derecho de la nave. Los gases incandescentes erosionaron y perforaron un anillo de goma de la junta; por el orificio escapó una llama que acabaría por detonar el tanque exterior de combustible del aparato.

A nadie sorprendió la explicación. De las declaraciones pronunciadas ante la comisión Rogers (nombre que toma de su presidente, William P. Rogers, ex-secretario de estado norteamericano), se deduce que los anillos de los cohetes de despegue, de combustible

sólido, vienen constituyendo motivo de preocupación desde hace diez años. Las juntas de aislamiento forman parte esencial de los lanzadores que, en los cohetes de combustible sólido de gran tamaño, se construyen por secciones. Son varias las razones que aconsejan ese diseño. En primer lugar, el combustible se carga en forma líquida, y quizá el secado y curación no se desarrollaran correctamente si se vertiera en depósitos del tamaño de la lanzadera. En segundo lugar, el cohete entero resultaría demasiado voluminoso para transportarlo en ferrocarril desde el lugar de construcción hasta las rampas de lanzamiento, y no quedaba otra opción, pues los cohetes se fabrican en Utah, que no da al mar. En 1977 la NASA había ya puesto objeciones al método de ensamblaje de las secciones propuesto por el fabricante, Morton Thiokol, Inc. Los ensayos efectuados en esa fecha señalaron que el método de aislamiento de las juntas entre secciones empleado por Thiokol podría erosionar las mismas y provocar fugas.

Durante el segundo vuelo de la lanzadera espacial, en noviembre de 1981,



El fallo de una junta de aislamiento condenó al fracaso el vuelo de la lanzadera espacial cuando ésta aún se hallaba en la rampa de lanzamiento. A los 0,678 segundos de encenderse el cohete de despegue situado en la parte derecha de la nave apareció una nube ascendente de humo. En la primera fotografía (izquierda) la junta de aislamiento afectada queda al pie

uno de los anillos del cohete de lanzamiento derecho se erosionó, sin que llegara a producirse fuga de gases. Los anillos sufrieron daños en 11 vuelos posteriores (a menudo en más de una junta) y en nueve vuelos los gases incandescentes perforaron el anillo circular “principal” cuando menos de una junta, aunque no llegaron a atravesar totalmente el resto del aislamiento.

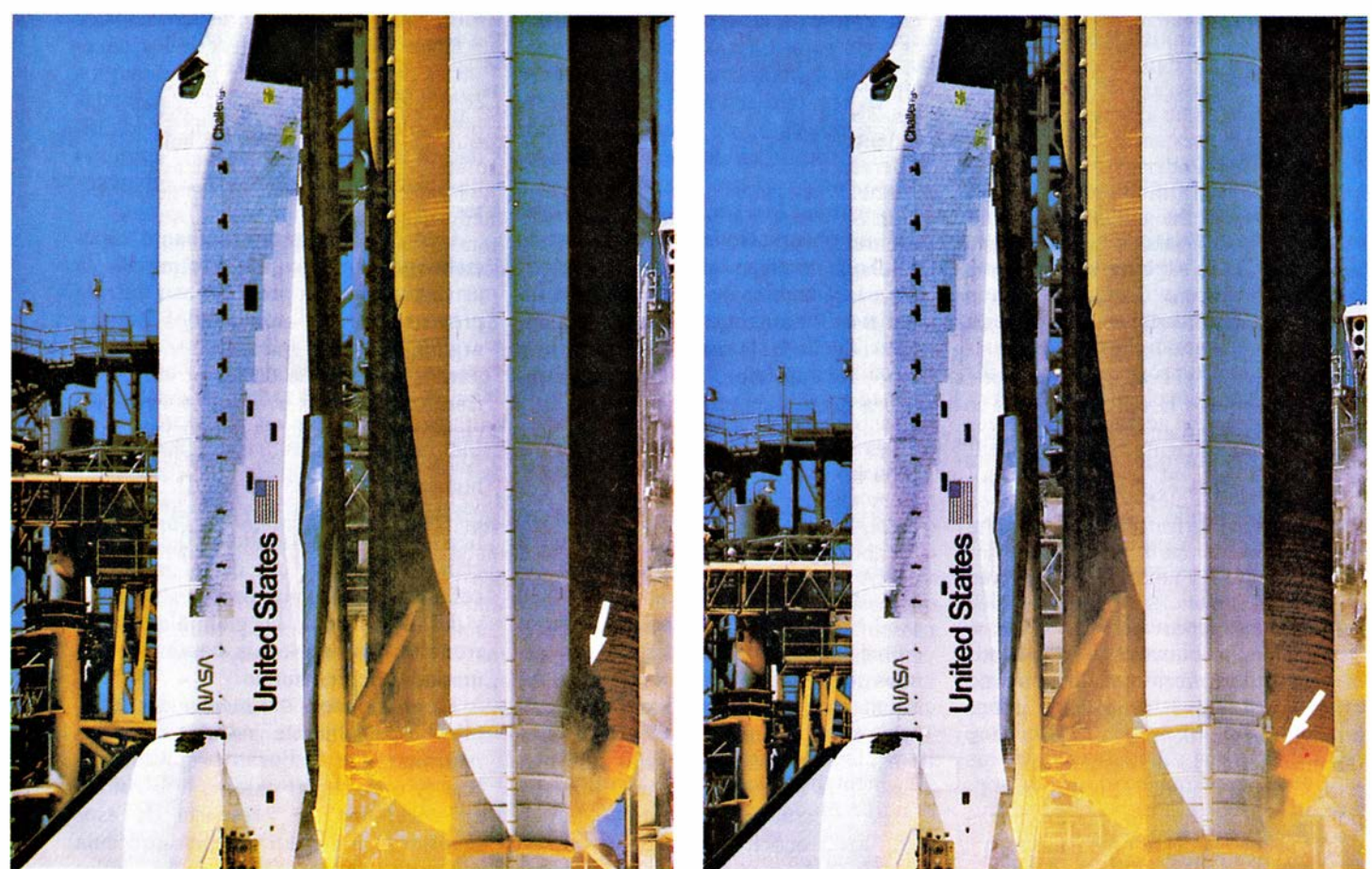
La inesperada fragilidad de las juntas alarmó a los especialistas de Thiokol. En julio de 1985, Roger M. Boisjoly, ingeniero de esa empresa, dirigió un memorándum a Robert K. Lund, vicepresidente de la división de ingeniería, “para tener la seguridad de que los directivos conocen en sus verdaderas dimensiones la gravedad del problema que plantea la erosión de los anillos... Si no creamos de inmediato un equipo para resolver el problema, me temo, y se trata de un temor honesto y real, que corremos el riesgo de perder un vuelo, junto con las instalaciones de lanzamiento.” La primera palabra de un memorándum, redactado en octubre de 1985 por el jefe del grupo creado por fin para abordar el problema es “¡SO-

CORRO!”, y el documento acaba exclamando: “Esto es una bandera roja”. La preocupación de los ingenieros se agudizó la víspera del lanzamiento del *Challenger* cuando, en el transcurso de una teleconferencia, intentaron convencer a las directivas de la NASA y de Thiokol de que suspendieran el despegue, debido a las temperaturas, extremadamente bajas, que se registraban en la rampa de lanzamiento.

¿Por qué se permitió el vuelo de las lanzaderas, cuando algunos de sus componentes sufrían daños imprevisibles? Según Feynman, los directivos de la NASA y de Thiokol aceptaron el riesgo planteado por los anillos porque en los vuelos anteriores su erosión no había provocado el fallo de los cohetes de lanzamiento. En las misiones realizadas hasta entonces se había advertido una erosión que no superaba un tercio del radio. Según datos experimentales, para que fallara un anillo debía erosionarse el equivalente a un radio entero, de ahí que se le asignara “un factor de seguridad de tres”. Apunta Feynman que “se trata de una curiosa utilización del término ingenieril de ‘factor de se-

guridad’... La erosión constituía un indicio de que algo funcionaba mal, y no algo a partir de lo cual pudiera deducirse un nivel de seguridad”.

Los técnicos pretendieron interpretar el daño elaborando un modelo matemático, basado en los datos recogidos de la erosión de los anillos en vuelos anteriores, que permitiera predecir la magnitud de la alteración que cabía esperar en diversas circunstancias. Feynman comenta cómo se desarrolló el modelo y el planteamiento final que se le dio, y añade: “¡Nada hay tan nefasto como creerse la respuesta! Por doquier aparecen dudas... Se conocía la escasa fiabilidad de la fórmula empírica, pues no se ajustaba a la multitud de datos a partir de los cuales se determinó”. La NASA se valió de ese modelo matemático para justificar el vuelo bajo riesgos cada vez superiores. Feynman repasa también el diseño, ensayo y aprobación del motor principal de la lanzadera, de combustible líquido, para concluir que, en ese caso, asimismo, se produjo un “ligero desplazamiento hacia la reducción del factor de seguridad”. En esa y otras ocasiones, “de modo sutil y a me-



de la nube, cerca de la porción superior de la sección hemisférica del tanque externo de combustible (naranja). En las imágenes subsiguientes se aprecia que la nube invierte su posición respecto de la nave a medida que ésta inicia el ascenso. Las fotografías, tomadas por una cámara de la NASA, forman parte del informe redactado por la comisión presidencial

nudo por medio de argumentos aparentemente lógicos, se alteraron los criterios a fin de que pudiera aprobarse el despegue a tiempo”.

Para valorar las posibilidades de que fallara una lanzadera espacial, los directivos de la NASA introdujeron lo que han dado en llamar “juicio ingenieril” en sustitución del método convencional de cálculo de probabilidades. Situaron la probabilidad de fracaso en uno por 100.0000. Los ingenieros que participaban en el proyecto la juzgaban inferior a uno por 100. Se pregunta Feynman que “si debe sustituirse el método convencional de probabilidades por el juicio ingenieril, ¿por qué se advierte tal disparidad entre la valoración de la directiva y la de los ingenieros?”

Plantea Feynman la hipótesis de que la causa fundamental del sistemático exceso de confianza de la NASA deriva de que una de las tareas principales de los directivos de la agencia espacial es la obtención de fondos del Congreso. Pintaron un cuadro teñido de rosa de los logros que podían alcanzarse con la tecnología disponible. En la conferencia de prensa convocada con motivo de la exposición de sus objeciones, Feynman apuntó que “exagerando los logros de que se creían capaces, acabaron por negarse a oír la verdad... La misión del *Challenger* constituyó el accidente final de una secuencia de hechos que una y otra vez advertían de que algo fallaba... Durante diez años estuvieron discutiendo ese problema sin mover un dedo... porque se temían las consecuencias de que saliera a relucir la información. Pero sabemos que en los niveles inferiores sí se disponía de esa información. Ignoro por qué los ingenieros ocupan los niveles inferiores de decisión, pero en esas organizaciones quienes dominan la realidad de las cosas se encuentran en el nivel más bajo, mientras que los que saben cómo influir sobre otros explicándoles las bellezas de su mundo... ocupan la cima”.

Aun cuando Feynman juzga a la directiva de la NASA con más dureza que el informe oficial, éste viene a sugerir que los planes originales de la NASA, en lo que atañe a la lanzadera, pecaban de un exceso de ambición: la ambición por ofrecer un acceso ordinario y económico al espacio llevó a la NASA a adoptar un calendario demasiado apretado para lo que daban de sí los recursos disponibles. Por ejemplo, las existencias de piezas de repuesto no bastaban para acomodarse a los planes de lanzamiento, de tal modo que para poner a punto una lanzadera se echaba mano de componentes de las otras. Opina la

comisión que el empeño en hacer de la lanzadera el principal sistema norteamericano de transporte espacial sometió el programa a una presión excesiva para acomodarse a las previsiones y dar el tratamiento adecuado a cualquier tipo de cargamento. También la actitud, por parte de la NASA, de que todo podía hacerse, su empeño en abordar tareas complejas en el último minuto, agotó los recursos de las dotaciones de tierra y obligó a sus técnicos a centrarse en objetivos inmediatos, a costa de la economía y seguridad a largo plazo.

El informe no recomienda cambios importantes de la estructura global del programa espacial, ni responsabiliza del accidente a los máximos directivos; dirige sus mayores críticas contra la dirección de Thiokol y el Centro Marshall de Vuelos Espaciales, la división de la NASA responsable de los cohetes de lanzamiento. Concluye con un llamamiento en favor de que persista el apoyo a la NASA.

Feynman va más allá, y relaciona el accidente con el exceso de optimismo de la directiva. Termina aconsejando a la NASA que adopte una postura realista en el cálculo de los costes y en la elaboración de previsiones. “Si no recibieran entonces el apoyo del gobierno, otra vez será. La NASA debe corresponder a los ciudadanos de quienes pide el apoyo con una actitud franca, honesta y comunicativa, de modo que éstos puedan tomar las decisiones más adecuadas sobre el uso que deba darse a sus recursos, que son limitados”. Y cierra sus observaciones con la apostilla del físico receloso de que la “fantasía” invada el ámbito de la ciencia y la ingeniería: “Para que la tecnología resulte adecuada, la realidad debe primar sobre las relaciones públicas; la naturaleza no se deja engañar”.

Nervios y linfocitos

Es cosa sabida que una actitud mental optimista ayuda al organismo a combatir la enfermedad, y que la depresión favorece la derrota. De lo cual cabe deducir que el sistema nervioso ejerce alguna influencia sobre las células que desencadenan la respuesta inmunitaria. Varios sorprendentes ejemplos así lo corroboran. Ciertos neurotransmisores (las sustancias que median en la actividad cerebral) influyen sobre la actuación de algunos linfocitos, los leucocitos a los que corresponde la defensa frente a los agentes invasores. Es más, se sabe que algunos linfocitos son sensibles a los neurotransmisores.

Parece haberse descubierto ahora la relación inversa. Los linfocitos denominados células *T* coadyuvantes (*helper*) sintetizan una proteína cuya presencia sólo se conocía en el cerebro (una proteína que consta de varias unidades del neurotransmisor encefalina). Resulta verosímil que la encefalina constituya una señal, de transmisión por vía sanguínea, que las células *T* coadyuvantes envían a efectores nerviosos. En otras palabras, puede que el sistema inmunitario influya sobre el nervioso.

Gerard Zurawski, John S. Abrams y sus colaboradores informan de ese hallazgo en *Science*. En trabajos realizados en el Instituto de Investigación de Biología Molecular y Celular DNAX, de la compañía Schering-Plough, de Palo Alto, California, esos autores abordaron el estudio de las células *T* coadyuvantes de ratón. La activación por medio de la proteína concanavalina *A* indujo la secreción de diversas linfocinas, proteínas que coordinan la actividad de otros componentes celulares de la respuesta inmunitaria. Los investigadores analizaron los ARN mensajeros (ARNm) contenidos en las células activadas, ignorando los de las células que no daban respuesta. Los ARNm portan las instrucciones necesarias para la síntesis de proteínas; los contenidos sólo en las células activadas probablemente informen de la identidad de algunas de las señales químicas que elaboran las células *T* coadyuvantes.

Uno de los mensajeros llamó especialmente la atención. Determinaba la estructura de una proteína con nutrida presencia de los aminoácidos lisina y arginina, que a menudo señalan los puntos de escisión de las proteínas en fracciones menores. También era frecuente la aparición de encefalinas (que son péptidos, esto es, cadenas de aminoácidos de escasa longitud). Se comprobó que el mensajero llevaba, codificada (con una fidelidad del 97 por ciento), la estructura de la preproenkefalina de rata, una proteína cerebral y de la médula de las glándulas suprarrenales. Esa molécula contiene siete unidades de encefalina.

La abundancia del mensajero resultaba especialmente notable. En las neuronas que elaboran preproenkefalina (y que, según parece, la escinden en encefalina) la presencia de esos mensajeros es inferior a una molécula por cada 3000 de ARNm; en las células suprarrenales que sintetizan preproenkefalina se halla en una proporción de uno por 1000. En las células *T* coad-

yuvantes parecía, sin embargo, superar la proporción de una molécula por cada 250 ARNm; tal abundancia resultaba comparable con la de los mensajeros de linfocinas conocidas. No cabía duda de que las células *T* coadyuvantes activadas fabricaban gran cantidad de preoencefalina. Quizá respondan a la invasión del organismo secretando al torrente sanguíneo esa molécula, o la propia encefalina, además de las linfocinas conocidas y otras proteínas aún por identificar.

Zurawski, Abrams y sus colaboradores no se pronuncian sobre la función que pueda corresponder a esas secreciones. Quizá el sistema inmunitario emplea la encefalina como una linfocina más, para coordinar localmente la actividad de otras linfocinas; o a lo mejor la utiliza de señal para ciertas partes del sistema nervioso periférico, por ejemplo, fibras sensoriales o ganglios autónomos. Más aún, pese a encontrarse el cerebro y la médula espinal aislados de gran parte de los productos que circulan por la sangre, no sería prudente descartarlos como posibles órganos efectores. Abrams señala que, en ciertas ocasiones, se ha descubierto la presencia de células *T* coadyuvantes en el cerebro.

Comer para olvidar

Engordamos cuando ingerimos más calorías de las que quemamos. ¿Qué nos incita a ese exceso alimentario? Las pruebas presentadas ante una conferencia de la Academia de Ciencias de Nueva York señalan que un subgrupo de obesos (los “ávidos de carbohidratos”) comen sin tasa con el propósito inconsciente de vencer la depresión.

Richard J. Wurtman y Judith J. Wurtman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, organizadores de la conferencia, acaban de descubrir que los amigos de los azúcares se sienten más seguros –menos deprimidos– después de un almuerzo de hidratos de carbono que los sujetos que suelen elegir otros platos. Sospechan los Wurtman que el bienestar experimentado por esos adictos a los carbohidratos responde a un incremento de los niveles de serotonina, un compuesto cerebral. Tras una comida compuesta fundamentalmente de hidratos de carbono aumenta la síntesis de serotonina, que influye sobre la sensación de saciedad y sobre el estado de ánimo. No resulta inverosímil, afirman los autores, que los ávidos de carbohidratos (quizá la mitad de los obesos) se excedan en la

ingesta para provocar cambios de humor inducidos por la serotonina.

Recientes estudios sobre la depresión y su tratamiento vienen a apoyar también la existencia de ese nexo entre el estado de ánimo y el exceso en el consumo de hidratos de carbono. En efecto, Norman E. Rosenthal y sus colegas, del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, informa que dos tercios de los individuos a los que se les ha diagnosticado el síndrome de trastorno afectivo estacional (SAD), de reciente definición, ingieren compulsivamente carbohidratos y engordan en las fases de depresión. Las víctimas del SAD padecen una respuesta exagerada a los cambios de estación: en invierno se muestran decaídos, letárgicos e introvertidos, mientras que en primavera y en el verano se les ve radiantes y activos. Muchos de los afectados de SAD pierden peso en primavera y, según las primeras pruebas obtenidas por los Wurtman, eligen menos comidas de carbohidratos en esa estación que en invierno.

Otros estudios, sobre los fármacos antidepresivos que incrementan los niveles de serotonina en las sinapsis cerebrales, vienen a sumar pruebas en favor del nexo entre alimentación y estado de ánimo, a la vez que apuntan nuevos posibles tratamientos. En Francia, donde puede adquirirse la d-fenfluramina, una de esas drogas, Christine Nathan y sus colegas, del Instituto Internacional Servier de Investigación, han demostrado que la d-fenfluramina disminuye la ingesta compulsiva y rebaja la toma de carbohidratos por parte de los obesos de esa índole: también favorece la pérdida de peso. De modo similar, los Wurtman y su colega Dermot O'Rourke han hallado que la d-fenfluramina mejoraba los síntomas depresivos invernales y la tendencia a devorar hidratos de carbono. Según otros investigadores, el antidepresivo fluoxetine podría provocar la pérdida de peso en sujetos obesos.

Por supuesto, los ávidos de carbohidratos no constituyen más que uno de los posibles subgrupos de los individuos que engordan demasiado. En efecto, muchos de los participantes en la conferencia destacaron la importancia de que la obesidad no puede ya interpretarse como un trastorno aislado, producto de una causa única. Entre los muchos motivos se contarían el defecto de síntesis de serotonina o de otras sustancias relacionadas con la saciedad o la elección de alimento, así como el descenso de la tasa de combustión de calorías.

Estructura de las cordilleras

¿Qué sostiene las montañas? Unas se apoyan en placas de roca dura; otras flotan en raíces corticales que penetran profundamente en el manto. Si cedieran sus flancos, estas últimas se desplomarían.

Peter Molnar

Lo que primero suele sorprendernos al contemplar una montaña es la topografía: su dimensión extraordinaria, las formas labradas por glaciares y ríos, los contornos romos y decorados con vegetación. Muchos sienten el mismo temor reverencial que ante determinadas construcciones humanas, como los arcos y vidrieras polícromas de una catedral gótica. Al observar un paisaje resulta fácil olvidar que se requieren fuerzas enormes para levantar y sostener una cordillera. Todas ellas, cual catedrales, se apoyan sobre cimientos, sin los cuales se derrumbarían. Si se desea experimentar algo más que un asombro mudo ante montañas o edificios, será preciso comprender los mecanismos invisibles que sostienen la belleza visible. He aquí el propósito de este artículo: describir la estructura subyacente —la tectónica, si no la arquitectura— de las cordilleras.

Dos clases de sostén

La analogía con la arquitectura no es mera retórica; las diversas soluciones que los arquitectos han dado al problema de afianzar los edificios encuentran paralelismos en la estructura de las cordilleras. Una de ellas es construir sobre cimientos de roca dura, inflexible. Por ejemplo, algunos de los edificios más altos del mundo se alzan sobre esquisto de Manhattan, una formación rocosa que no se ha calentado ni deformado significativamente (y por tanto no se ha debilitado) desde finales del Precámbrico, hace unos 600 millones de años. Las montañas más altas del mundo, el Himalaya, son como esos rascacielos: se alzan sobre un grueso escudo de roca precámbrica dura, el borde septentrional del subcontinente indio.

Con todo, para sostener un gran edificio no se requiere ningún zócalo duro. Trabajo en un bloque de 20 pisos, en Cambridge, Massachusetts, que se apoya en pilares clavados 40 metros en

relleno artificial y morrena glacial en lo que un día fue una cuenca de marea a lo largo del río Charles. En cierto modo, el edificio flota sobre depósitos saturados de agua; visto así, no difiere mucho de un gran barco. También las montañas pueden sostenerse por la flotación de material liviano sobre material más pesado. Un ejemplo lo constituye la meseta del Tíbet, al norte del Himalaya, casi toda situada a más de 4500 metros de altitud. A diferencia del substrato del Himalaya, el de la meseta parece débil y deformable, como el relleno que subyace al bloque de mi oficina o el agua que soporta a un buque.

La exploración de la India

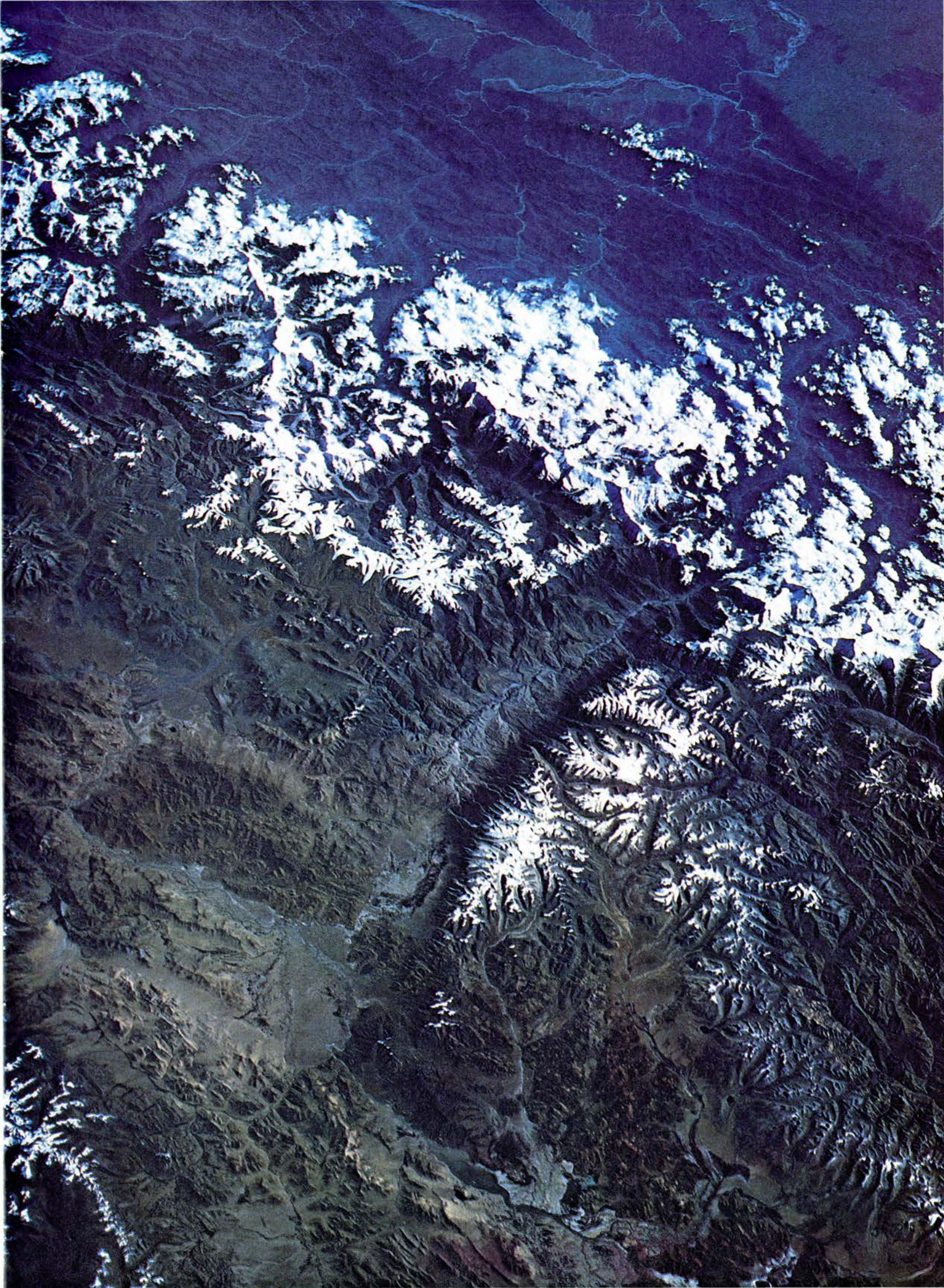
El Himalaya y la contigua meseta tibetana ejemplifican, pues, dos mecanismos distintos de sustentación de cordilleras, que pueden actuar a la vez en un mismo sistema montañoso. De hecho, el estudio de esta región, hace 140 años, brindó los primeros avances en la interpretación de la estructura de las montañas. Fueron pioneros el explorador George Everest, J. H. Pratt, arcediano de Calcuta con inquietudes científicas, y George B. Airy, el eminente físico-matemático y Astrónomo Real de Gran Bretaña. La propia historia de su obra constituye una muestra fascinante de trabajo intelectual.

En la década de 1840 Everest dirigió la primera prospección topográfica del subcontinente indio. Su equipo empleaba dos métodos para medir distan-

cias. Por una parte, medían distancias cortas con la técnica exploratoria convencional de triangulación, alcanzando paso a paso distancias mayores. Por otra parte, determinaban la posición relativa de dos puntos muy distantes observando la posición de una estrella de referencia desde ambos puntos a la misma hora. En principio, los dos métodos deberían haber arrojado resultados parecidos, pero en la práctica las discrepancias fueron notables. La más sonada concernía a la distancia entre las ciudades de Kalia y Kalianpur, respectivamente a 100 y 700 kilómetros al sur del frente del Himalaya. La exploración astronómica situaba las dos ciudades unos 150 metros más próximas que la triangulación.

Everest supuso que la acumulación de errores en la triangulación explicaba la discrepancia; en 1854 Pratt demostró que el error yacía en las mediciones astronómicas. Para determinar la posición de una estrella en la esfera celeste los exploradores debían conocer con precisión la dirección del cenit (la dirección vertical), definida por la plomada. Pratt sugirió que la atracción gravitatoria ejercida por la gran masa del Himalaya y la meseta tibetana desviaría la caída de la plomada hacia el norte, y que la desviación sería mayor en Kalia que en Kalianpur, pues Kalia está más cerca de las montañas. La diferencia resultante de las direcciones medidas del cenit habría introducido un error en el cálculo de las posiciones relativas de ambas ciudades.

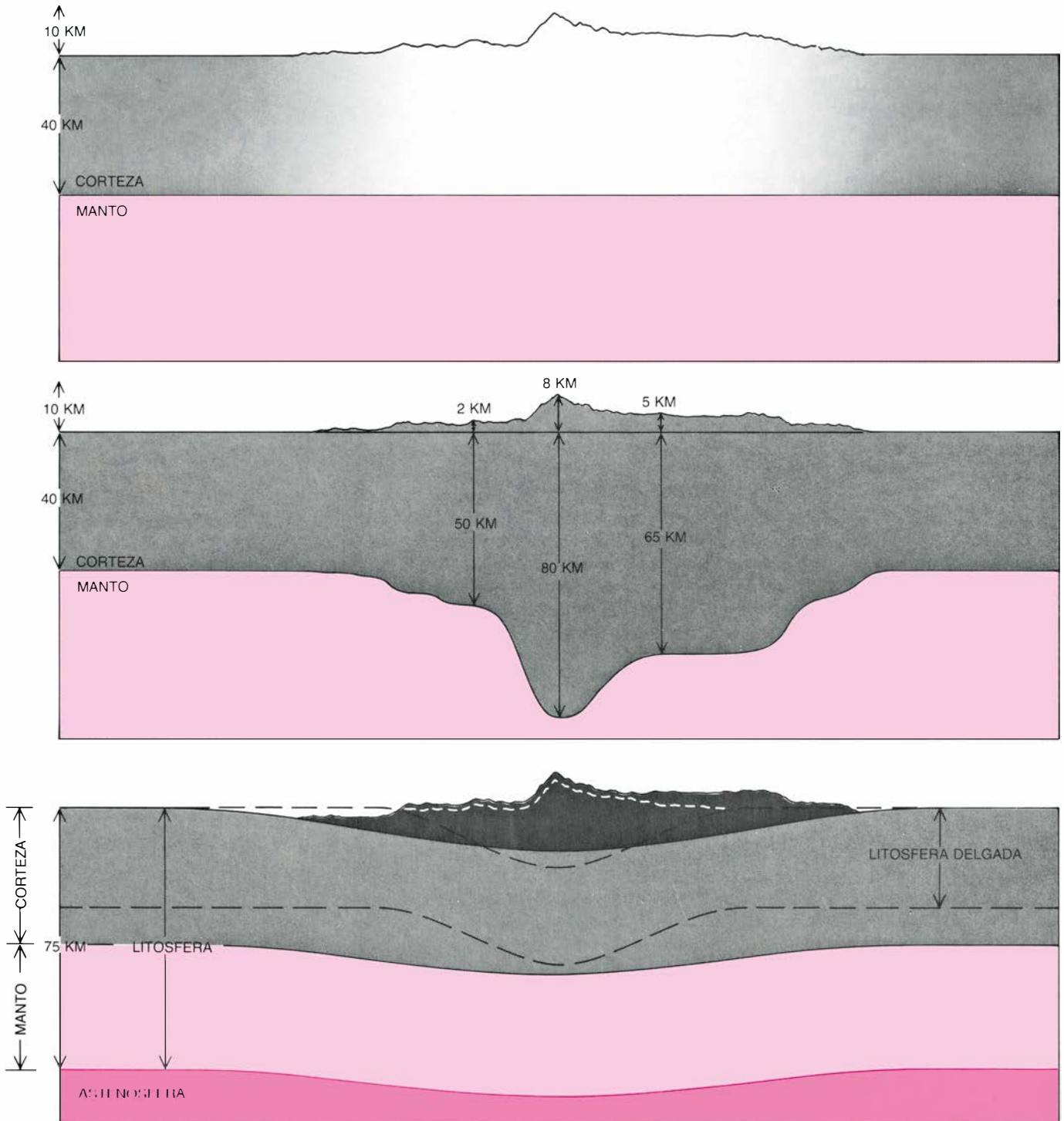
1. HIMALAYA Y TIBET ejemplifican los dos mecanismos de sustentación de cordilleras y mesetas. La panorámica que recoge esta fotografía, tomada desde la lanzadera espacial *Challenger*, mira hacia el sur, sobre el Tíbet meridional, Nepal e India septentrional; abarca un área de unos 175 kilómetros de anchura. Los picos nevados del Himalaya están parcialmente ocultos por nubes. Se hallan en el borde norte de la rígida placa india, que se comba hacia abajo para distribuir su peso; la llanura del Ganges, que aparece tras las montañas, debe su existencia a ese combamiento. Por el contrario, la alta meseta tibetana se apoya en una profunda raíz de corteza flotante. Las cortezas gruesas tienden a ser débiles y, si no están trabadas por fuerzas horizontales, pueden desparramarse. Así ocurre en el Tíbet, que se está extendiendo progresivamente y poco a poco se desploma. El gran valle del centro de la fotografía es un graben, fosa tectónica formada donde se ha hundido un bloque de corteza a lo largo de fallas normales, resultante de la extensión a que está sometida la corteza adyacente. El graben corta pliegues orientados de este a oeste, resultantes del choque entre India y Eurasia que levantó el Himalaya. Por el sur se prolonga en el valle Kali Gandaki, flanqueado por el Annapurna, al este, y por el Dhaulagiri, al oeste. Ambos picos sobrepasan los 8000 metros de altura.



Cuando Pratt trató de determinar la magnitud del error estimando la masa del Himalaya y de la meseta tibetana, efectuó un descubrimiento asombroso. Sus resultados indicaban que la caída de la plomada debía desviarse unos 28 segundos de arco en Kalia y unos 12 en Kalianpur. Los 16 segundos de arco de diferencia pueden parecer pocos,

pero en realidad correspondían a un error de medida de la distancia astronómica tres veces mayor que la discrepancia de 150 metros que se había observado. Según Pratt, la diferencia real en la desviación gravitatoria de la caída de la plomada parecía ser sólo de unos cinco segundos de arco, lo que implicaba que había sobreestimado la masa

de las montañas; había mucha menos masa bajo el Himalaya y el Tíbet que la sugerida por sus análisis topográficos. En realidad, si Pratt hubiera tenido acceso a mapas topográficos precisos (sus mapas situaban la mayor parte del Tíbet a sólo la mitad de su altitud real) habría deducido una “falta” de masa todavía mayor.



2. TRES MECANISMOS de compensación isostática que plasman distintas interpretaciones de la sustentación de las montañas. En el siglo XIX, J. H. Pratt y George B. Airy sugirieron que las montañas se sostienen sólo por la flotación de la corteza sobre el manto, más denso que aquella; según esa hipótesis, el exceso de masa de una cordillera se compensa por un déficit de masa directamente bajo ella. Pratt propuso (*arriba*) que la densidad de la corteza varía lateralmente y que las montañas se elevan donde la densidad es baja (*gris claro*). Airy (*centro*) supuso que la corteza es de densidad uniforme, pero más gruesa bajo las cor-

dilleras: como los icebergs, las montañas se sostienen por raíces profundas de material flotante. Felix A. Vening-Meinesz, en cambio, propuso que la compensación de las cordilleras tiene carácter regional y no local (*abajo*). El peso de las montañas dobla una capa dura, hoy llamada litosfera, que suele incluir la corteza y parte del manto y que cubre una capa débil parecida a un fluido, a la que denominamos astenosfera. El combamiento de la litosfera distribuye la carga por una amplia región. Las montañas se elevan más sobre litosfera gruesa porque ésta se dobla en menor medida que la litosfera delgada (*línea de trazos*).

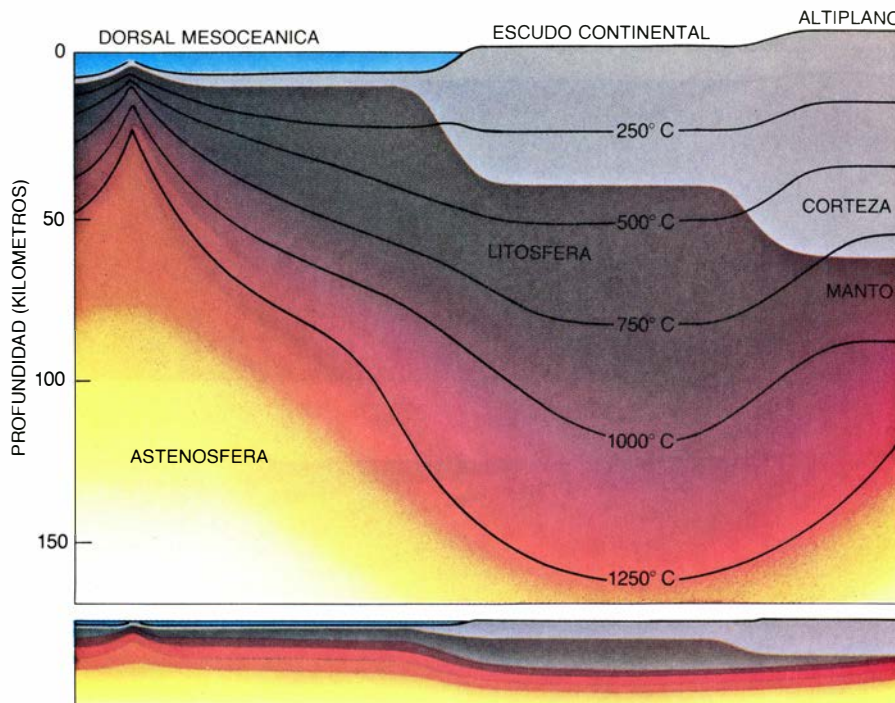
Airy leyó el artículo de Pratt en su despacho de Londres. Aunque la idea de la falta de masa le sorprendió en un comienzo, no tardó en advertir que la superficie terrestre no fuera quizá suficientemente dura para sostener una vasta masa de montañas sin sufrir deformación alguna. La deformación conlleva un déficit de masa bajo las montañas, que compensa el exceso de masa en superficie. Muchos estamos familiarizados con compensaciones de este tipo, por el fenómeno que descubrió Arquímedes, cuando nos sumergimos en una bañera llena y ésta rebosa; en geología se denomina isostasia.

Corteza y manto

En el modelo de isostasia postulado por Airy, la corteza terrestre, liviana, flotaba en un substrato más pesado, pero débil, parecido a un fluido: el manto. Hoy se conoce bien la composición química de la corteza, que, en efecto, es más ligera que el manto. Si bien ambas están constituidas principalmente por oxígeno y silicio, los elementos relativamente pesados hierro y magnesio abundan mucho más en el manto. En cambio, en la corteza se concentran fracciones mayores de elementos relativamente livianos, así sodio, calcio, aluminio y potasio. La corteza, por tanto, es menos densa que el manto, de ahí que no resulte ilógico pensar, como lo hizo Airy, que aquella flota sobre éste como la nata en la leche. Y a imagen de lo que ocurre con éstas, el límite entre corteza y manto es también muy abrupto.

Pratt compartía la idea de Airy de que la corteza flotaba, pero ambos discrepaban respecto del mecanismo subyacente a la compensación isostática. Pratt creía que la temperatura, y por tanto la densidad, de la corteza variaba de un lugar a otro. Donde la corteza estuviera más caldeada y fuera más ligera que el promedio, subiría y formaría montañas; donde estuviera fría y fuera densa, se hundiría y formaría vastas tierras bajas. Por el contrario, Airy consideraba que la densidad de la corteza era bastante uniforme, y lo que variaba era el grosor. La corteza sería más gruesa bajo las montañas, decía, que bajo zonas bajas; las montañas visibles serían como las puntas de icebergs y, al igual que ellos, se apoyarían en raíces profundas invisibles.

Los estudios sismológicos efectuados en el transcurso de las últimas décadas han confirmado la predicción de Airy sobre la importante variación del grosor de la corteza. Por término medio, la corteza continental alcanza de 30 a



3. LITOSFERA Y ASTENOSFERA en un corte transversal exagerado verticalmente (*arriba*) y otro sin exagerar (*abajo*). La diferencia entre las dos capas radica en la temperatura: la litosfera está más fría, y por eso es más dura que la astenosfera. El límite entre ambas no es abrupto; puede situarse en torno a los 1300 grados Celsius. En cambio, el límite químico entre corteza y manto es nítido. El grosor de la litosfera varía notablemente. Bajo dorsales mesoocéánicas, donde aquella se crea por ascenso de material caliente desde la astenosfera, es muy delgada; bajo los escudos continentales, formados por corteza que no se ha calentado desde hace 600 millones de años o más, su grosor puede rebasar los 150 kilómetros. Bajo algunas mesetas elevadas, sin embargo, la litosfera no es gruesa. En realidad, bajo el Tíbet el límite térmico entre litosfera y astenosfera parece hallarse en la corteza. La corteza subyacente al Tíbet está caliente y es flexible.

40 kilómetros de grosor, pero bajo las montañas la potencia puede aumentar hasta los 75 kilómetros. Las raíces corticales compensan el exceso de masa de las montañas desplazando roca del manto, más densa. La corteza situada bajo los océanos profundos compensa la baja densidad del agua con un grosor de sólo seis kilómetros. Los movimientos de rocas inducidos por la gravedad mantienen a la Tierra en un equilibrio isostático aproximado, de modo que cualquier columna imaginaria de Tierra tendría una masa igual tanto si en su superficie apareciera una cordillera como parte de un océano.

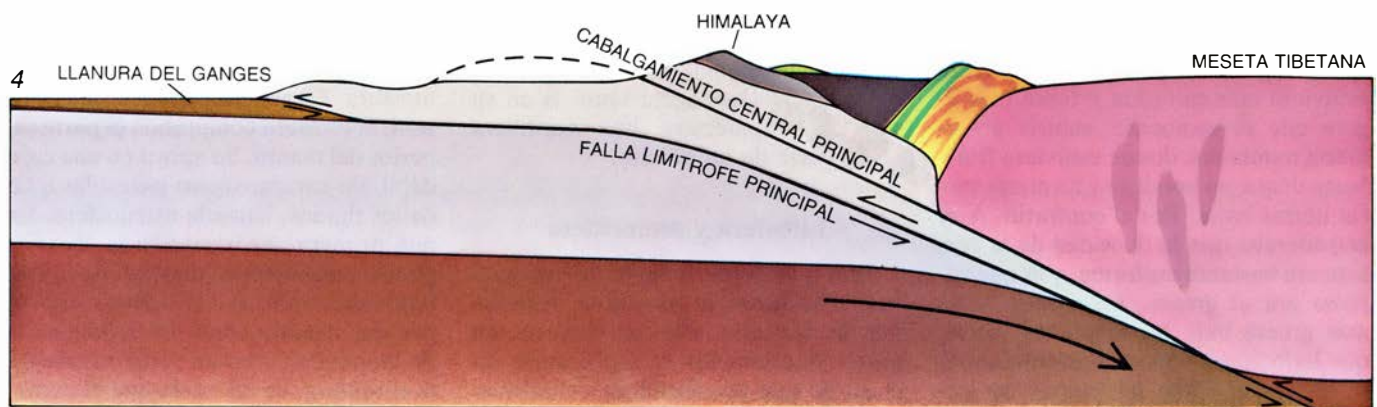
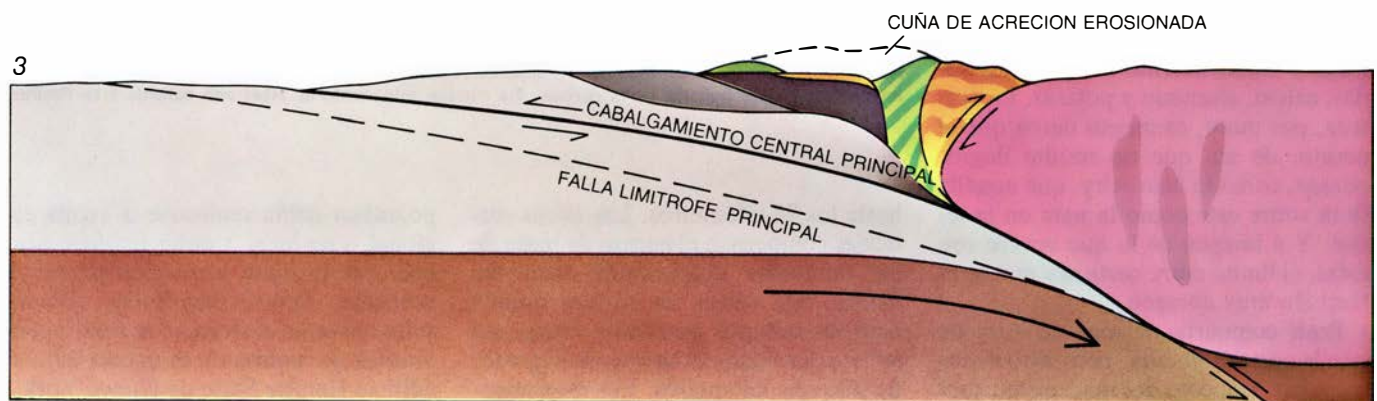
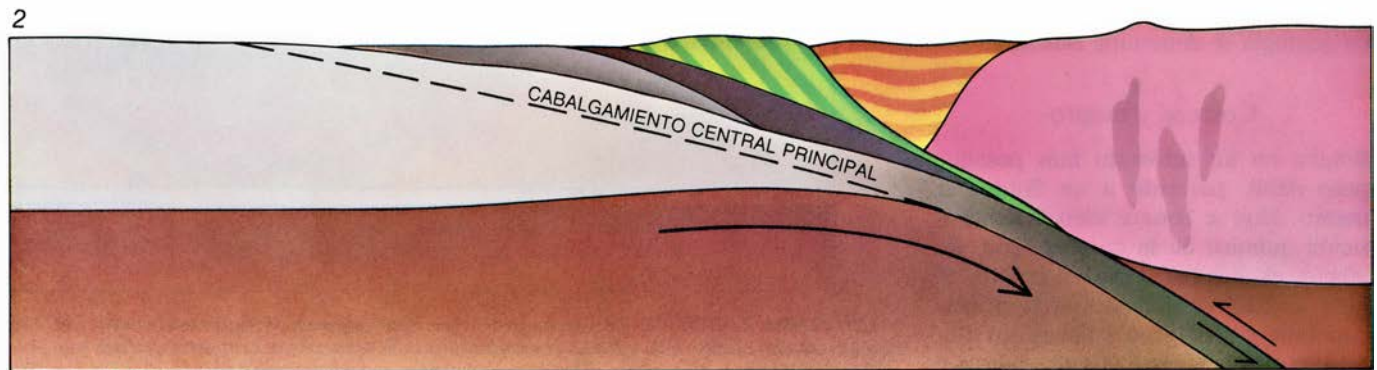
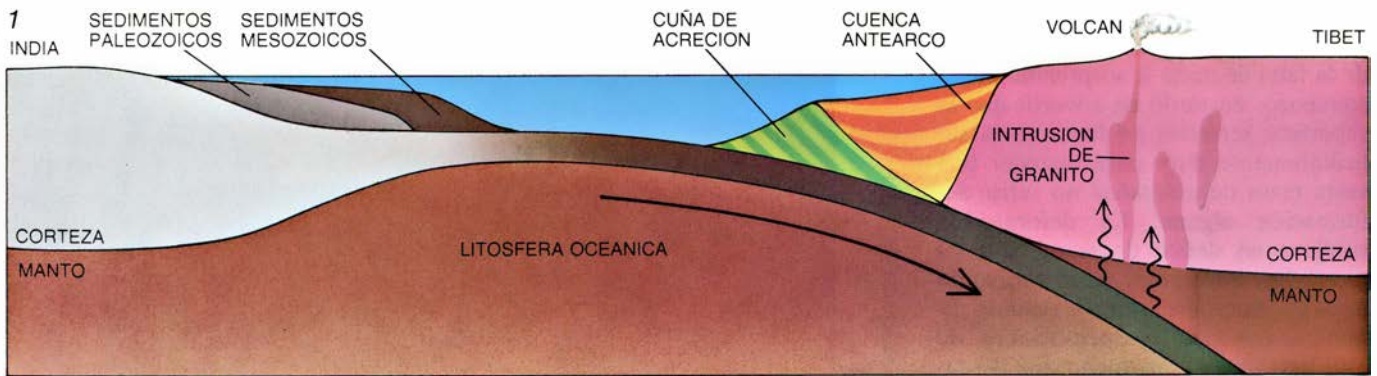
Litosfera y astenosfera

Pese a lo impresionante de las pruebas en su favor, la versión de Airy sobre la isostasia sólo es correcta en parte. A principios de siglo, antes incluso de que los sismólogos confirmaran que el grosor de la corteza variaba, se comprobó que el manto, como la corteza, no era líquido, sino sólido. Por tanto, la imagen de que la corteza flota sobre el manto constituye una simplificación excesiva, y lo mismo cabe decir de la hipótesis de Airy. En la década de 1930, el geofísico holandés Felix A. Vening-Meinesz sugirió que la com-

pensación isostática de una carga topográfica debía realizarse a escala regional, y no local, y debía implicar algo más que la mera formación de raíces corticales. (En el caso límite, ello resulta obvio; la corteza no se hunde centenas de metros en el manto bajo el edificio Empire State de Nueva York.)

En concreto, Vening-Meinesz propuso que las grandes cargas, por ejemplo una cordillera, desvían la capa exterior dura de la Tierra, hoy llamada litosfera. En general, además de la corteza, la litosfera comprende la parte superior del manto. Se apoya en una capa débil, de características parecidas a las de los fluidos, llamada astenosfera. En una primera aproximación la litosfera puede considerarse elástica: se dobla bajo las cordilleras y distribuye el peso por una extensa zona. El hundimiento de la litosfera crea un surco paralelo a la cordillera, de tal modo que el exceso de masa de las montañas se compensa en parte con una mengua de aquella en el surco, y no con una mengua debajo mismo de la cordillera.

Sabemos hoy que la litosfera no es una capa continua, sino que consta de una veintena de placas separadas. Los movimientos de las placas sobre la astenosfera explican la formación de cuencas oceánicas y cordilleras, así



4. SE FORMO EL HIMALAYA cuando la placa litosférica india emigró hacia el norte y chocó contra la placa euroasiática. El choque se indica mediante diagramas simplificados, exagerados verticalmente. Hace unos 60 millones de años la litosfera oceánica del borde delantero de la placa india se subducía bajo el Tibet meridional (1). El magma ascendente erupió sobre la placa india y formó intrusiones graníticas. Los sedimentos y corteza oceánica raspados de la placa descendente se amontonaron en un prisma de acreción, que creó una cuenca antearco donde quedaron atrapados los sedimentos erosionados del Tibet. Hace entre 55 y 40 millones de años las dos masas emergidas chocaron (2). Probablemente la corteza india flotara demasiado para sumergirse en profundidad bajo el Tibet, por lo que la corteza india entera se rompió por una falla nueva, el Cabalgamiento Central Principal. Luego prosiguió el movimiento a lo largo de

la falla (3). Un trozo de corteza india coronado con sedimentos paleozoicos y mesozoicos que se habían depositado en la plataforma continental cabalgó sobre el subcontinente que se aproximaba. La cuña de acreción y los sedimentos antearco cabalaron en dirección norte sobre el Tibet. (Desde entonces gran parte de este material se ha erosionado.) Hace entre 20 y 10 millones de años, el Cabalgamiento Central Principal cesó en su actividad. La India ha venido resbalando hacia el norte a lo largo de una segunda falla, la Falla Límite Principal (4). Un segundo fragmento de corteza ha cabalgado sobre el subcontinente, levantando el primero. Las dos escamas levantadas constituyen la mayor parte de la mole del Himalaya; muchos picos están coronados por sedimentos paleozoicos. La placa india se combea bajo el peso de las montañas, y bajo la llanura del Ganges se advierte el surco resultante, hoy colmatado de sedimentos.

como otros fenómenos, a los que colectivamente se les denomina tectónica de placas. Si bien las descripciones de esos movimientos horizontales no suelen tratar las placas como cuerpos elásticos, sino rígidos, ello no contradice la hipótesis de Vening-Meinesz, según la cual la litosfera se dobla elásticamente bajo las cargas topográficas. Las placas litosféricas vienen a ser como tablas de madera: tendidas sobre el suelo, se mueven rígidamente cuando se las empuja, pero se comban si se les coloca una carga pesada encima.

La astenosfera ofrece resistencia de flotación al combamiento de la litosfera, pero ésta no flota en la astenosfera. A diferencia del límite que separa la corteza del manto, el que señala el paso entre litosfera y astenosfera no es de índole química, por cuya razón la diferencia de densidad a través suyo resulta despreciable. La fuerza de flotación recuperadora ejercida por la astenosfera deriva de que es mucho más densa que la capa de aire o de agua situada sobre la litosfera sometida a flexión.

Las diferencias entre litosfera y astenosfera más que de composición son térmicas: la litosfera es más fría, lo que explica su mayor dureza. En la litosfera la temperatura aumenta rápidamente con la profundidad, alcanzando los 1300 grados Celsius en el límite con la astenosfera. No existe una frontera abrupta, como ocurre entre corteza y manto, de ahí que los investigadores no se hayan puesto de acuerdo en su definición. De lo que no cabe duda es que, al igual que sucede en la corteza, el grosor de la litosfera es muy variable, desde menos de 10 kilómetros hasta más de 150.

Cuanto más gruesa es una tabla de madera, más carga soporta y menos se deforma. Lo mismo ocurre en la litosfera. Las placas gruesas son más rígidas que las delgadas y se doblan menos bajo el peso de una cordillera. Por consiguiente, a igualdad de las condiciones restantes, una montaña debería ser más alta si se apoya sobre una placa gruesa que si la sostiene una placa delgada. No obstante, las placas delgadas pueden sostener montañas de gran altura del modo concebido por Airy, por medio de profundas raíces corticales. Los mecanismos isostáticos planteados por Airy y Vening-Meinesz no se excluyen mutuamente. Antes bien, se ha comprobado que una cordillera puede sostenerse por un sólido cimientado de litosfera gruesa (como los rascacielos de Nueva York), por raíces profundas de corteza liviana (como un barco) o por una combinación de ambos mecanis-

mos. La importancia relativa de los mecanismos varía en cada caso.

Himalaya y Tíbet

Para determinar qué mecanismo es más importante en el caso del Himalaya y la meseta tibetana conviene considerar primero cómo se formaron esas montañas. Hace unos 70 millones de años, la India y las rocas que hoy constituyen el Himalaya se hallaban unos 8000 kilómetros al sur de su emplazamiento actual. Migraban hacia el norte, de la Antártida a Asia, sobre una gran placa compuesta principalmente por litosfera oceánica. El Tíbet meridional quedaba en la costa sur de Asia y unos 2000 kilómetros al sur de donde se encuentra hoy. Cuando chocaron las placas india y euroasiática, la litosfera oceánica situada al norte de la masa emergida india se combó hacia abajo y por debajo del Tíbet, como lo hacen ahora las placas del océano Pacífico cabalgadas por Japón, las Aleutianas y Suramérica. (Los geólogos denominamos subducción ese proceso.) Fue como si la placa india actuara de cinta transportadora y arrastrara un carrito por debajo del Tíbet meridional.

En algún momento, hace entre 55 y 40 millones de años, la masa continental india chocó contra la costa sur de Asia, y en este punto la cinta transportadora empezó a atascarse; la velocidad de la placa india se redujo desde entre 10 y 20 centímetros por año a unos cinco centímetros anuales (a ese ritmo sigue sumergiéndose hoy la India bajo Eurasia). Al cobijarse la India bajo el Tíbet, con tremenda fuerza, una falla de buzamiento norte desgarró el borde septentrional del subcontinente. La corteza situada por debajo del plano de falla siguió desplazándose hacia el norte y hacia abajo, pero del subcontinente que avanzaba se cortó una rebanada de plataforma continental y corteza profunda, que retrocabalgó sobre aquél. El proceso se repitió 20 o 10 millones de años atrás: la primera falla perdió actividad y se formó otra en un nivel más profundo. Una segunda rebanada cabalgó sobre el subcontinente, elevándose la primera. Los restos erosionados de esas dos láminas afloran hoy en el Himalaya y constituyen la mayor parte de la masa de la cordillera.

El gran peso del Himalaya comba la placa india al sur de la cordillera. En el transcurso de millones de años, los sedimentos erosionados de las montañas han rellenado el surco resultante, formando las vastas llanuras de los ríos Ganges e Indo. Los datos sismológicos y de sondeos obtenidos por la Comi-

sión del Petróleo y Gas Natural de la India han documentado la presencia del surco en el zócalo precámbrico subyacente a los sedimentos. La roca firme buza suavemente al norte, hacia las montañas, y queda a una profundidad de unos cinco kilómetros en el frente. Unos 200 o 300 kilómetros al sur del frente, en el borde del surco, la roca firme aflora en superficie.

Dado el gran peso del Himalaya, el surco no es muy profundo. La placa india, de notable grosor y dureza, se dobla poco. No puede determinarse con precisión el grosor de ninguna placa, pero dando por buenas ciertas suposiciones simplificadoras cabe calcular el grosor relativo de algunas. Hélène Lyon-Caen, de la Universidad de París, ha demostrado que el grosor de la placa india supera en más de dos veces el de la placa pacífica que subyace a las Hawái.

La dureza y la potencia de la litosfera india son causas principales de la elevación de los picos del Himalaya. En absoluto los sostienen raíces corticales profundas, al modo propuesto por Airy. En el Himalaya, el grosor de la corteza es de sólo 55 kilómetros, superior a los 35 o 40 observados bajo el resto de la India, pero mucho menor que los aproximadamente 80 kilómetros que se requerirían para sostener las montañas sólo por flotación cortical. El Himalaya constituye un caso claro donde no se cumple la hipótesis de Airy de compensación isostática local y exige aplicar la noción de Vening-Meinesz de compensación regional por combamiento de la litosfera.

En cambio, sí se ajusta a ella la meseta tibetana, que se extiende centenares de kilómetros al norte de las montañas y únicamente en algunos valles próximos a los bordes no alcanza su altitud los 4500 metros. Estudios sismológicos realizados por Wang-Ping Chen, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y Barbara Romanowicz, de la Universidad de París, inducen a pensar que la corteza tibetana tiene un grosor de unos 65 a 70 kilómetros —es más gruesa que la corteza subyacente a los picos del Himalaya. El peso de la alta meseta se compensa principalmente con la flotación de su profunda raíz cortical, tal como propuso Airy hace 130 años.

Otras cordilleras

Otras cordilleras y mesetas elevadas confirman la dicotomía estructural ejemplificada por el Himalaya y el Tíbet. El abundante plegamiento de capas rocosas de los Alpes prueba que se

formaron de modo similar al Himalaya, con material cortical arrancado del borde meridional de Europa y que cabalgó hacia el norte sobre la placa europea cuando ésta chocó con la punta italiana de la placa africana. La cuenca de las Molassas, en Suiza noroccidental, es análoga a las llanuras del Ganges y el Indo: está colmatada por restos erosionados de los Alpes y su existencia se debe, cuando menos en parte, al combamiento hacia abajo de la placa europea bajo el peso de las montañas. Garry D. Karner, hoy en la Universidad de Durham, y Anthony B. Watts, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, han demostrado que el grosor de la placa europea es sólo la mitad del de la placa india. Esa diferencia podría explicar por qué el Himalaya casi dobla la altura de los Alpes. El Himalaya se apoya sobre cimientos más duros.

Las Montañas Rocosas canadienses también se asientan sobre una placa litosférica combada hacia abajo. Todavía se discute cuál fue el proceso exacto de formación de las Rocosas, pero no cabe duda de que son gajos de rocas sedimentarias arrancados sucesivamente de la roca del zócalo subyacente e imbricados hacia el este, cabalgados unos

a otros. La exploración minuciosa de la región ha demostrado que el zócalo rocoso, parte del escudo canadiense precámbrico, buza suavemente hacia el oeste bajo las montañas. El buzamiento de la litosfera indica que el peso de las montañas se compensa regionalmente, como predijo Vening-Meinesz.

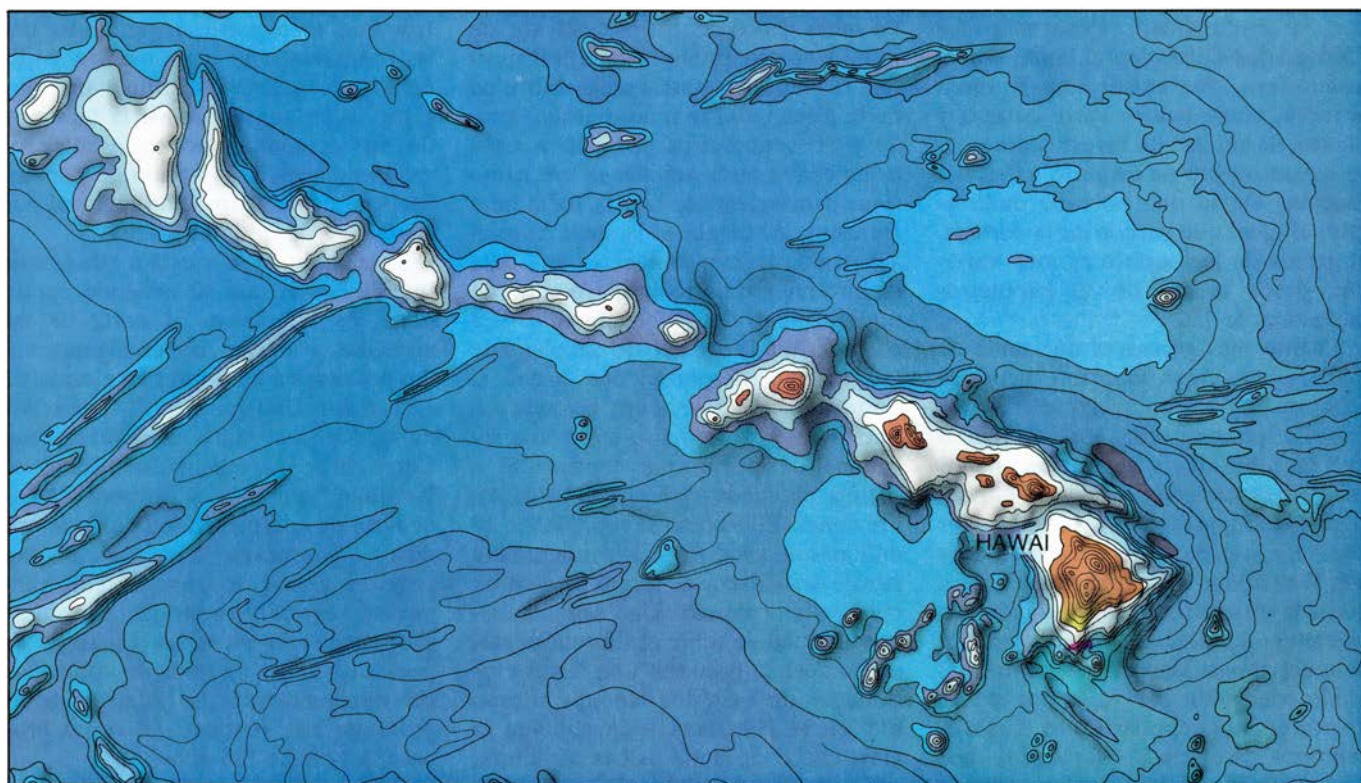
Aunque se formaron de modo completamente distinto, las islas Hawai constituyen otro ejemplo de compensación regional. De origen volcánico, se levantaron por el vertido, sobre el fondo oceánico, de roca fundida, que ascendió desde la astenosfera, atravesando la litosfera pacífica. Los picos resultantes son gigantescos: el Mauna Kea, en Hawai, se alza más de 4200 metros sobre el nivel del mar y unos 9000 metros sobre el fondo oceánico circundante. El peso de las islas comba la placa pacífica unos centenares de metros hacia abajo, creando un “foso” en torno a ellas. Fuera del foso, la placa se arquea levemente hacia arriba, ante la resistencia que la astenosfera opone a la flexión de la litosfera.

Mientras que los Alpes, las Rocosas canadienses y las islas Hawai presentan zócalos parecidos a los del Himalaya, los Andes, las montañas más altas del hemisferio occidental, se asemejan más

al Tíbet. El peso de la cordillera parece sostenerse gracias a una raíz cortical flotante de hasta 70 kilómetros de profundidad. En realidad, la corteza andina ha constituido el foco del debate sobre una de las cuestiones importantes que quedan por resolver en lo que atañe a la formación de montañas: cómo (y no por qué, pues Airy lo explicó) se engrosa la corteza bajo muchas cordilleras.

Caben dos respuestas. En primer lugar, la corteza puede crecer por acumulación de magma volcánico que mana del manto y se enfría en la corteza, formando intrusiones de granito y otras rocas ígneas. En segundo lugar, los bloques de corteza se engrosan cuando se acortan por acción de fuerzas horizontales, que aproximan sus márgenes. En los Andes se da a la vez vulcanismo intrusivo y acortamiento cortical; de los dos, ¿qué proceso contribuye más al engrosamiento de la corteza?

La cordillera occidental de los Andes es un arco volcánico del tipo de los que suelen encontrarse sobre las zonas de subducción, donde una placa litosférica se sumerge debajo de otra. A medida que la placa Nazca cargada de corteza pacífica se introduce en la astenosfera,



PROFUNDIDAD (METROS)

SOBRE EL NIVEL DEL MAR

0-1000

1000-2000

2000-3000

3000-4000

4000-4500

4500-5000

5000-6000

MAS DE 6000

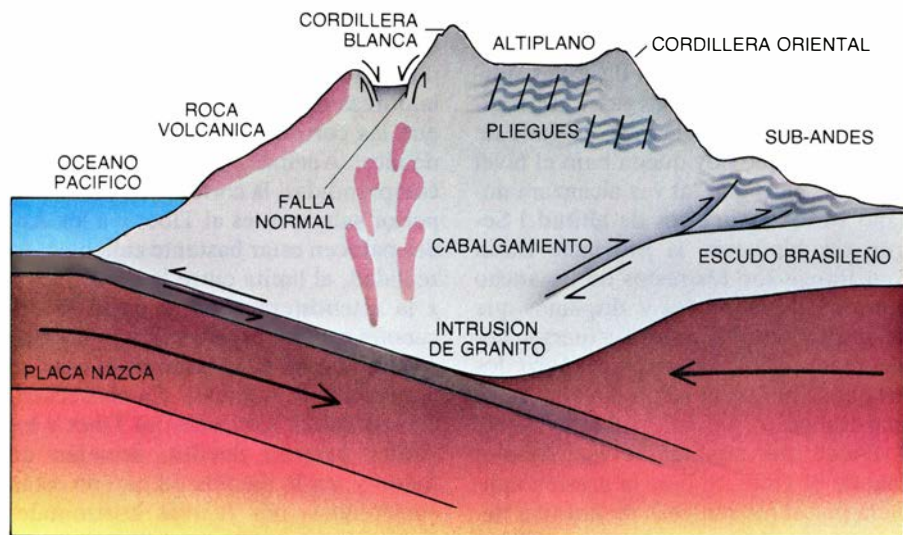
5. FLEXION DE LA LITOSFERA. Resulta patente en esta carta batimétrica de los alrededores de las islas Hawai, estructuras volcánicas levantadas por la lava vertida sobre el fondo del mar. Su peso comba la litosfera hacia abajo varios centenares de metros, formando un “foso” que alcanza su profundidad máxima alrededor de la isla Hawai. Probablemente una amplia región del fondo marino en torno a las islas se haya abovedado por el ascenso de roca caliente en la astenosfera; al norte y al sur de la región hawayana el océano es más profundo.

se calienta y por la corteza de la placa suramericana cabalgante asciende roca fundida —ya sea de la propia placa Nazca o de la astenosfera que la cubre—, formando volcanes e intrusiones graníticas. Ello explica que las rocas de los Andes occidentales y de las llanuras costeras de Perú y Chile sean predominantemente volcánicas. En cambio, la mayoría de las rocas del elevado altiplano central y de la cordillera oriental no son volcánicas, sino sedimentarias, plegadas e imbricadas unas en otras. El plegamiento y cabalgamiento prueban que en esas regiones la corteza se ha acortado en dirección perpendicular a la de la cordillera.

Persiste el acortamiento cortical en el flanco oriental de los Andes. Sismogramas analizados por Douglas S. Chinn y Bryan Isacks, de la Universidad de Cornell, Gerardo Suárez, de la Universidad Nacional Autónoma de México, y William Stauder, de la Universidad de St. Louis, indican que los terremotos del flanco oriental se producen a lo largo de fallas, precisamente donde el escudo continental brasileño se introduce hacia el oeste, cabalgado por las montañas. El ritmo de cobijadura parece cifrarse en sólo escasos milímetros anuales, pero pudo haber sido mayor en el pasado. En opinión de Suárez, Lyon-Caen y B. Clark Burchfield, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y del propio autor, el principal responsable del gran grosor de la corteza subyacente a la cordillera oriental es ese acortamiento cortical, no el vulcanismo. La corteza crece a medida que los Andes son estrujados por la cobijadura hacia el este de la Placa Nazca y por la cobijadura hacia el oeste del escudo brasileño.

Las montañas se caen

La flotación de la raíz cortical sostiene el peso de las montañas, pero las fuerzas horizontales que crean la raíz parecen ejercer un efecto más directo: reforzar los Andes e impedir que se abran y desplomen. Por ironía de las cosas, la prueba que avala esa idea procede en parte de la observación de que los contrafuertes están fallando. Mientras que por los flancos de la cordillera se ejerce presión contra la corteza, en algunas zonas de los altos Andes la corteza se está abriendo. La Cordillera Blanca, una cadena occidental que incluye el pico más alto del Perú, el Huascarán, constituye buen ejemplo de ello. El límite de su falda occidental es una abrupta falla que discurre paralela a la cordillera; al oeste de la falla, la corteza se ha caído y separado de



6. ANDES PERUANOS, representados en esta ilustración por un corte transversal simplificado. Las montañas se apoyan en una raíz cortical profunda. Bajo la Cordillera Blanca, situada al oeste, la corteza se ha engrosado con intrusiones de material volcánico que asciende por encima de la placa Nazca a medida que ésta se sumerge bajo Sudamérica. La convergencia de ambas placas también engrosa la corteza, que el empuje acorta. Las formaciones rocosas plegadas de los sub-Andes orientales demuestran que en ese punto la corteza se está acortando y levantando, a medida que el escudo brasileño se cobija bajo las montañas. El plegamiento de las rocas sedimentarias del altiplano sugiere que se formaron anteriormente por el mismo proceso. De ahí que muchos investigadores consideren que es el acortamiento cortical, y no el vulcanismo, el mecanismo responsable principal de la altura de los Andes y el grosor de la corteza. Aunque las faldas de los Andes todavía sufren un empuje hacia el centro, la corteza de los altos Andes se está estirando: en la ladera occidental de la Cordillera Blanca se han hundido grandes bloques de corteza a lo largo de fallas normales. Puede que los Andes se estén desplomando por disminución de las fuerzas horizontales que los vienen sosteniendo.

las montañas. En ese tipo de falla, denominada normal, un bloque de corteza se hunde respecto de otro a lo largo del plano de falla. Constituye claro indicio de extensión cortical.

Mi analogía inicial entre cordilleras y catedrales góticas ayudará a esclarecer la importancia de las fallas normales en los Andes. Los picos y altiplanos andinos, el techo del hemisferio occidental, vienen a ser el techo abovedado del edificio. Las bóvedas ejercen presiones hacia fuera, que tienden a mantener las paredes separadas. (En el caso de la catedral, el empuje no sólo se debe a la gravedad, sino también a la carga de los vientos.) Para que no se cayera el techo, los arquitectos góticos construían enormes arbotantes que contrarrestaban las fuerzas centrífugas ejercidas sobre las paredes. Los arquitectos modernos preferirían resolver el problema de otro modo: basta con tirar de las paredes opuestas con cables de acero; los cables habrían de poder soportar la suficiente fuerza de extensión para mantener las paredes juntas.

En cierto modo, la placa Nazca y el escudo brasileño constituyen los arbotantes de los Andes. Su empuje horizontal contra los flancos de la cordillera ayuda a sostener los altos picos y altiplanos. Lo que sugieren las fallas normales de los altos Andes es que las fuerzas horizontales de sustentación no son ya lo bastante intensas para desempeñar adecuadamente sus funciones, ni

las rocas que forman las montañas son suficientemente resistentes para hacer las veces de cables de acero y mantener unidas las montañas. Si bien la corteza sufre todavía empuje por el flanco oriental de las montañas, en los altos Andes se está extendiendo: el techo se cae. La cordillera entera puede haber entrado en una fase de declive que la lleve al desplome bajo su propio peso.

Si los Andes se caen, probablemente no sean las primeras montañas que sufran ese destino. Muchos investigadores consideramos los Andes el análogo moderno de una cordillera que dominó el oeste de Estados Unidos hace entre 80 y 30 millones de años, cuando, más al este, nacían las Rocosas. A la sazón, una placa litosférica situada bajo el Pacífico oriental convergía con la placa norteamericana y se subducía litosfera oceánica, igual que hoy se subduce la placa Nazca bajo Sudamérica. Entre 30 y 10 millones de años atrás, cesó la subducción bajo Norteamérica. Al detenerse la convergencia disminuyeron, o incluso desaparecieron, las fuerzas horizontales que habían acortado y engrosado la corteza bajo la cordillera.

A partir de entonces la corteza empezaría a abrirse. Abundan los indicios de extensión cortical en la provincia Basin and Range, al oeste de las Rocosas, entre Utah central y Sierra Nevada: las cuencas y sierras basculadas alternantes están limitadas por fallas normales como las que aparecen al

oeste de la Cordillera Blanca. Al extenderse la corteza se hundieron bloques enteros a lo largo de fallas normales, constituyendo las cuencas actuales. (Una de las cuencas es el Valle de la Muerte, que hoy queda bajo el nivel del mar, pero que tal vez alcanzara antaño varios kilómetros de altitud.) Según esa hipótesis, la provincia Basin and Range son los restos de un ancho cinturón de montañas y altiplanos que se desplomaron al ceder las fuerzas horizontales que los sostenían. Quizá los Andes se parezcan algún día a la Basin and Range.

Puede que también se esté desplomando el Tíbet. Si bien la presión aplicada por el movimiento de la India hacia el norte basta, según parece, para impedir que el Tíbet se extienda en dirección norte-sur, la alta meseta no cuenta con ningún soporte parecido en el flanco oriental. En consecuencia, la meseta está rajada por fallas normales meridianas, a lo largo de las cuales uno de los lados se hunde y se aleja del otro. El Tíbet se expande hacia el este, y en el proceso empuja a China suroccidental hacia el este respecto del resto de Asia.

¿Por qué los Andes y el Tíbet son susceptibles de venirse abajo? Por la sencilla razón de que, en gran medida, los sostienen profundas raíces corticales. La dureza de la roca cortical dis-

minuye rápidamente con el aumento de temperatura y, por tanto, de profundidad, probablemente más deprisa que la dureza de la roca del manto. De ahí que las cortezas gruesas tiendan a ser débiles. Además, por causas aún mal comprendidas, la corteza y el manto superior subyacentes al Tíbet y a los Andes parecen estar bastante calientes; en realidad, el límite entre la litosfera fría y la astenosfera caliente quizá se encuentre en la misma corteza, y no muy por debajo de ella, como es el caso en la mayoría de regiones. En consecuencia, las raíces corticales del Tíbet y los Andes parecen débiles, semejan un fluido y, en la medida en que no están constreñidas por fuerzas horizontales de soporte, tienden a desparramarse. A las fuerzas horizontales cabe achacar el mantenimiento de las raíces profundas y las altas mesetas. Paul Tapponnier, de la Universidad de París, y el autor, han sugerido que las mesetas pueden interpretarse a modo de manómetros: cuanto más sujetas se hallan a presión horizontal, tanto más altas son. Puede que en el Tíbet y en los Andes esa presión esté disminuyendo.

El Himalaya, los Alpes y las Rocosas, en cambio, los sostiene principalmente litosfera fuerte y gruesa, hecha de corteza y manto relativamente fríos. (Bajo el Himalaya, por ejemplo, la corteza está mucho más fría que bajo

el Tíbet, porque cabalga sobre la fría placa india.) Esas cordilleras no requieren un soporte horizontal para tenerse en pie, pese a que las formaron fuerzas horizontales. A juzgar por la ausencia general de fallas normales en ellas, no parece que se estén desplomando.

Dinámica

Algunas cadenas montañosas son como manómetros, otras como cargas dispuestas sobre placas elásticas. Las analogías valen hasta cierto punto, pero debo subrayar que se trata de simplificaciones; en un nivel de detalle más fino revelan sus limitaciones. Karner y Watts han demostrado, por ejemplo, que el peso de los Alpes no basta para combar la placa europea hasta el punto en que se encuentra bajo la cuenca de las Molinas: alguna fuerza adicional debe tirar de la placa hacia abajo. En cambio, Lyon-Caen y yo hemos comprobado que la resistencia de la placa india, con ser grande, no explica del todo las encumbradas alturas del Himalaya; al parecer, otra fuerza dobla hacia arriba el borde septentrional de la placa. También Hawái es impulsada hacia arriba. La profundidad del fondo oceánico en la vasta región que circunda las islas fuera del foso hawayano sólo es de unos 4500 metros, mientras



7. ROCAS SEDIMENTARIAS basculadas y plegadas en el altiplano andino. Indican que la meseta se formó por acortamiento de la corteza. La panorámica muestra una perspectiva hacia el sureste, desde el este de la Cordillera Blanca.

Las capas plegadas de calizas, areniscas y argilitas sufrieron empujes desde el este y el oeste, que levantaron y empujaron la corteza. También están plegadas las rocas de las montañas nevadas del fondo, parte de la cordillera occidental.

que un millar de kilómetros al norte y al sur la profundidad del océano es de unos 5500 metros.

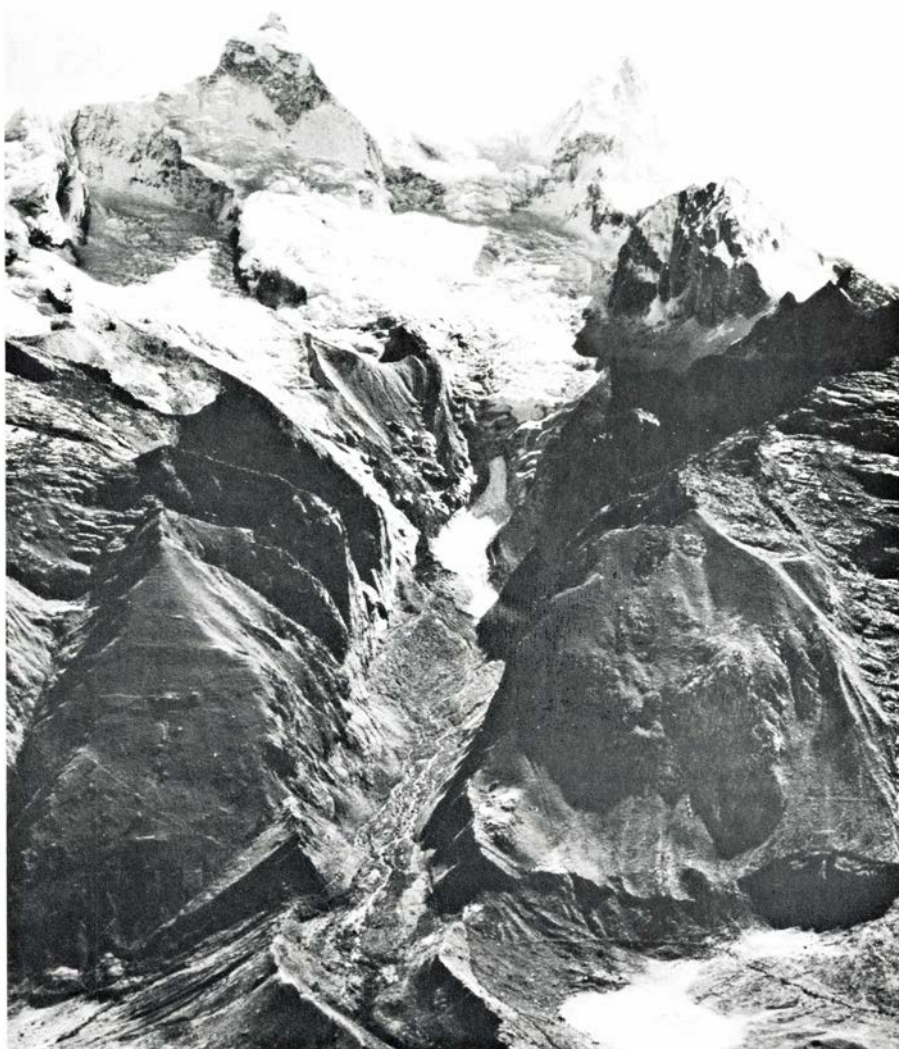
Tales desviaciones indican que el sencillo modelo de placa que se dobla bajo el peso de las montañas es incompleto. Falta una consideración de la dinámica de las placas, de las fuerzas que acercan continentes, acortan la corteza y provocan el cabalgamiento de vastos terrenos en los bordes de placas fuertes. Suele interpretarse los movimientos de las placas como las manifestaciones en superficie de una circulación convectiva que se extiende hasta gran profundidad en el manto, pero se desconoce el modelo global de circulación.

Con todo, cabe extraer algunas conclusiones. Por ejemplo, parece claro que Hawai se halla sobre una región de astenosfera de la que mana material caliente. Parte del material hace erupción en los volcanes sobre las islas, pero la columna ascendente es mucho más ancha que las propias islas. El empuje hacia arriba del material caliente explica el amplio abovedamiento del fondo marino en torno a las Hawai.

Bajo otras cadenas cabe esperar un descenso de material relativamente frío. Bajo el Himalaya, la placa india, despojada de las rebanadas corticales que constituyen las montañas, puede estar sumergiéndose en la astenosfera. El material de la parte alta de la placa está significativamente más frío, y por tanto es más denso, que la astenosfera; debería, pues, hundirse. El peso del material que se hunde puede ayudar a tirar de la placa hacia abajo. Al mismo tiempo, tal como hemos sostenido Lyon-Caen y yo, la parte de la placa situada inmediatamente detrás del borde delantero se arquearía, lo que ayudaría a empujar las montañas hacia arriba. (Para "ver" el fenómeno, tómese una regla de plástico o metal y dóblese un extremo sobre el borde de una mesa.) El material que se hunde podría impulsar, en el manto, una circulación que facilitara el choque de la India con Eurasia.

Medición de la gravedad

¿Cómo estudiar la dinámica del manto y determinar, en particular, si bajo las cordilleras se hunde material denso? Uno de los métodos consiste en medir las variaciones del campo gravitatorio terrestre; el campo debería ser levemente mayor en regiones de la Tierra apoyadas sobre material denso. Desgraciadamente, las diferencias de gravedad producidas por variaciones de densidad en el manto son pequeñas,



8. FALLAS NORMALES responsables de la abrupta ladera occidental de la Cordillera Blanca. El pico de la izquierda, el Huandoy, alcanza 6356 metros de altura. El escarpe que discurre a lo largo de las montañas y a través de morrenas dejadas por un glaciar que retrocedió es una falla normal activa. Respecto de las montañas, el valle de primer término ha bajado varios kilómetros a lo largo de esa falla y otras paralelas. Parece que la cordillera se está desplomando a medida que disminuye el empuje lateral y la corteza se extiende.

probablemente inferiores al 0,01 por ciento del valor medio de 9,8 metros por segundo cuadrado. En una región montañosa quedan enmascaradas por las diferencias, mucho mayores, provocadas por las variaciones topográficas. La corrección de los efectos topográficos exige disponer de mapas muy precisos; en regiones como el Himalaya ni siquiera se han trazado.

Probablemente la solución sea medir la gravedad mediante satélites. Un satélite se mueve muy por encima del campo de influencias gravitatorias de montañas y valles, pero su órbita registra leves perturbaciones, provocadas por las anomalías gravitatorias resultantes de las variaciones de densidad del manto. Siguiendo la pista de las perturbaciones puede cartografiarse el campo gravitatorio y las variaciones de densidad. Hasta el presente sólo se han trazado anomalías gravitatorias de gran envergadura, de millares de kilómetros

de anchura y no relacionadas con cordilleras. La obtención de registros mejores, o bien la dotación de nuevos instrumentos de medición a los satélites, que determinen directamente las variaciones laterales de la gravedad, tal vez permitan detectar las pequeñas anomalías provocadas por las variaciones de densidad bajo las cordilleras.

Cuando se cuente con tales mediciones se habrá dado un gran paso hacia la interpretación de las montañas, como accidentes que crecen y se degradan en una Tierra que cambia. Una apreciación más profunda de la dinámica de las cordilleras obligará a modificar algunos de los conceptos que he presentado aquí. Hasta entonces, los geofísicos seguirán en una situación parecida a la de los arquitectos góticos, que descubrieron que podían sostener catedrales gigantescas valiéndose de arbotantes, pero que nunca comprendieron los principios físicos subyacentes.

Núcleos atómicos exóticos

Poseen neutrones y protones en proporciones muy distintas de las que caracterizan a los núcleos encontrados en la naturaleza. Sus propiedades abren nuevas perspectivas sobre la materia

J.H. Hamilton y J.A. Maruhn

Cuando el tamaño de un objeto no alcanza la millonésima de milonésima de centímetro, carecemos de medios para medir directamente siquiera sus propiedades más simples. Hay que inferirlas. Lo que confiere más valor a nuestro creciente conocimiento de las propiedades del núcleo atómico, el conglomerado de protones y neutrones que constituye el corazón del átomo. Durante largo tiempo se supuso, por ejemplo, que todos los núcleos eran esféricos. Luego resultó que los había oblongos como los balones de rugby. Y ahora se ha llegado a la conclusión de que en muy raras ocasiones adquieren forma esférica. Las investigaciones posibilitadas por la nueva generación de aceleradores de partículas y de sistemas de detección muestran que no sólo pueden ser esféricos u oblongos, sino también achatados (en forma de disco), triaxiales (como un balón de rugby parcialmente desinflado) u octupolares (piriformes). En efecto, la concurrencia de diversas deformaciones origina un núcleo en “cacahuete” o en “balón de rugby con su ecuador protuberante”. De los recientemente descubiertos, algunos muestran deformaciones mucho mayores que las que jamás se imaginaron en núcleos estables. Más aún, contrariamente a lo sostenido hace sólo una década, resulta que ciertos núcleos presentan más de una forma fija.

En no pequeña cuantía, esas nuevas perspectivas han surgido a raíz de las investigaciones realizadas en núcleos atómicos bajo condiciones exóticas, muy alejadas de las correspondientes a los núcleos estables que se encuentran en la naturaleza. Por exótico se entiende aquí el núcleo que posee un número total de neutrones o de protones notablemente distinto del que ostentan los núcleos que se hallan en forma natural en la corteza terrestre. En este contexto, a lo largo de los experimentos realizados por los autores en el La-

boratorio Nacional de Oak Ridge, se descubrió el isótopo talio 184. Al igual que los restantes átomos de talio, su núcleo contiene 81 protones. (El número de protones es el mismo para todos los isótopos de un elemento químico dado.) Por otra parte, el talio 184 posee únicamente 103 neutrones, 19 menos que el isótopo de talio más ligero que se encuentra en la Tierra de manera natural. (El número de neutrones en el núcleo de un elemento varía de un isótopo a otro.)

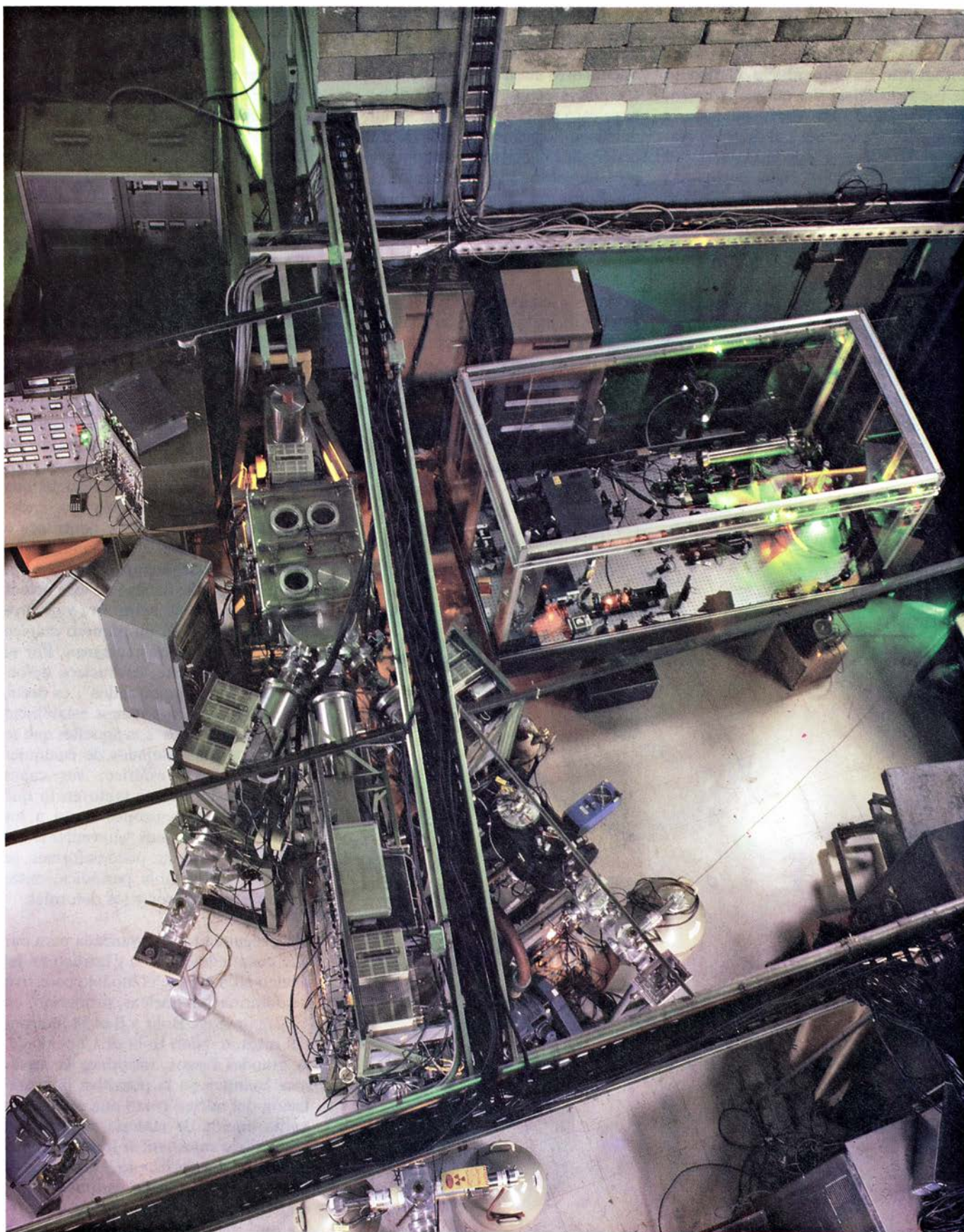
¿De qué manera el estudio de núcleos atómicos exóticos ha modificado nuestra explicación de lo que podríamos llamar el panorama nuclear? En primer lugar, se han identificado nuevos “números mágicos”. Los números mágicos establecidos representan las cantidades de protones o de neutrones que convierten a un núcleo esférico en resistente a cambiar determinadas propiedades, la forma por ejemplo. Los nuevos números aumentan la lista de los antiguos de una manera importante y confieren una estabilidad similar a los núcleos deformes. La existencia de estos nuevos números provoca, en ocasiones, conflictos entre un número mágico (40, por ejemplo), capaz de estabilizar un núcleo esférico, y otro número vecino (38), capaz de estabilizar un núcleo deforme. Además, en ciertos núcleos exóticos, las proporciones de protones y neutrones se encuentran cerca de números mágicos correspondientes a núcleos deformes. Tiene lugar, entonces, un efecto de refuerzo mutuo. Y de ello resulta una superdeformación: los estados fundamentales más deformes que se hayan observado nunca en núcleos atómicos. (Se denominan fundamentales los estados de mínima energía.)

El estudio de núcleos atómicos exóticos ha llevado también al descubrimiento de modos exóticos de desintegración radiactiva. En los modos familiares conocidos (desintegraciones

alfa, beta y gamma), el núcleo radiactivo emite una partícula alfa (dos neutrones y dos protones, lo que equivale a un núcleo de helio 4), una partícula beta (un electrón o un positrón) o un rayo gamma (un fotón de alta energía o cuanto de radiación electromagnética). Los modos exóticos descubiertos recientemente comienzan con una desintegración beta. Tras ella, el núcleo emite uno o dos protones, uno, dos o tres neutrones, o incluso un núcleo de hidrógeno 3; consta este último de un protón y dos neutrones. En otros modos más exóticos todavía, el núcleo que se desintegra emite un conglomerado de ocho neutrones y seis protones (un núcleo de carbono 14), o incluso 14 neutrones y 10 protones (un núcleo de neón 24). Las emisiones de conglomerados arrojan luz sobre la manera en que los nucleones (protones y neutrones) se hallan organizados en el interior de un núcleo.

Las perspectivas aportadas por la investigación de los núcleos atómicos exóticos deben considerarse prolongación de las exploraciones de los núcleos que se hallan en la naturaleza. El inicio de tales aproximaciones data de hace menos de 80 años. A finales del siglo XIX se desconocía la existencia del núcleo; creíase que el átomo era la última unidad de materia. Pero en 1896 se descubrió el fenómeno de la radiactividad. Los rayos alfa, beta y gamma emitidos por ciertos átomos fueron los embajadores que trajeron las primeras noticias acerca de la existencia de una *terra ignota*: el núcleo del átomo. Transcurrieron otros 14 años antes de que Ernest Rutherford estableciese que toda la carga eléctrica positiva de un átomo, así como casi toda su masa, conteníanse en el núcleo, un cuerpo central minúsculo, 100.000 veces menor que el propio átomo.

Los treinta años siguientes aportaron pocas novedades. El núcleo se asimi-



1. SEPARADOR DE ISOTOPOS ACOPLADO (en línea) del Centro Holifield de iones pesados del Laboratorio Nacional Oak Ridge, utilizado en las investigaciones sobre núcleos atómicos exóticos. Los núcleos exóticos emergen, detrás de un apantallamiento de hormigón, de las colisiones entre iones pesados y núcleos atómicos que se hallan en un blanco, por lo general, una lámina metálica. Un tren de imanes divide, entonces, los núcleos exóticos en corrientes, cada una de las cuales está constituida por los núcleos que tienen una misma masa. La corriente puede des-

viarse hacia cualquiera de los tres canales que divergen hacia la parte inferior de la fotografía. El canal de la derecha recibe también un haz de rayos de luz láser, el cual excita a los electrones en órbita alrededor de cada núcleo exótico. En consecuencia, los electrones interaccionan a su vez con el núcleo: gracias a eso podemos determinar el radio medio del núcleo, que constituye, a su vez, una pista firme para averiguar la forma que adquiere. La luz láser está producida por una secuencia de dos láseres instalados en el recinto situado en el centro de la parte derecha.

laba a una suerte de gota líquida esférica que podía vibrar o escindirse en otras menores. Aparecieron entonces dos teorías. En primer lugar, el modelo de capas esféricas del núcleo atómico; fue propuesto, en 1949, por Maria Goeppert Mayer, del Laboratorio Nacional de Argonne y de la Universidad de Chicago, y por J. Hans D. Jensen, de la Universidad de Heidelberg. Este modelo impone a los nucleones del núcleo los mismos principios de la mecánica cuántica que se habían aplicado anteriormente a los electrones en órbita alrededor del núcleo. La mecánica cuántica establece que los neutrones y protones confinados en un núcleo sólo tienen a su disposición un conjunto discreto de estados, correspondiendo cada uno de ellos a una cantidad específica de energía y a un esquema específico de movimiento. Por otro lado, la ley de la mecánica cuántica llamada “princi-

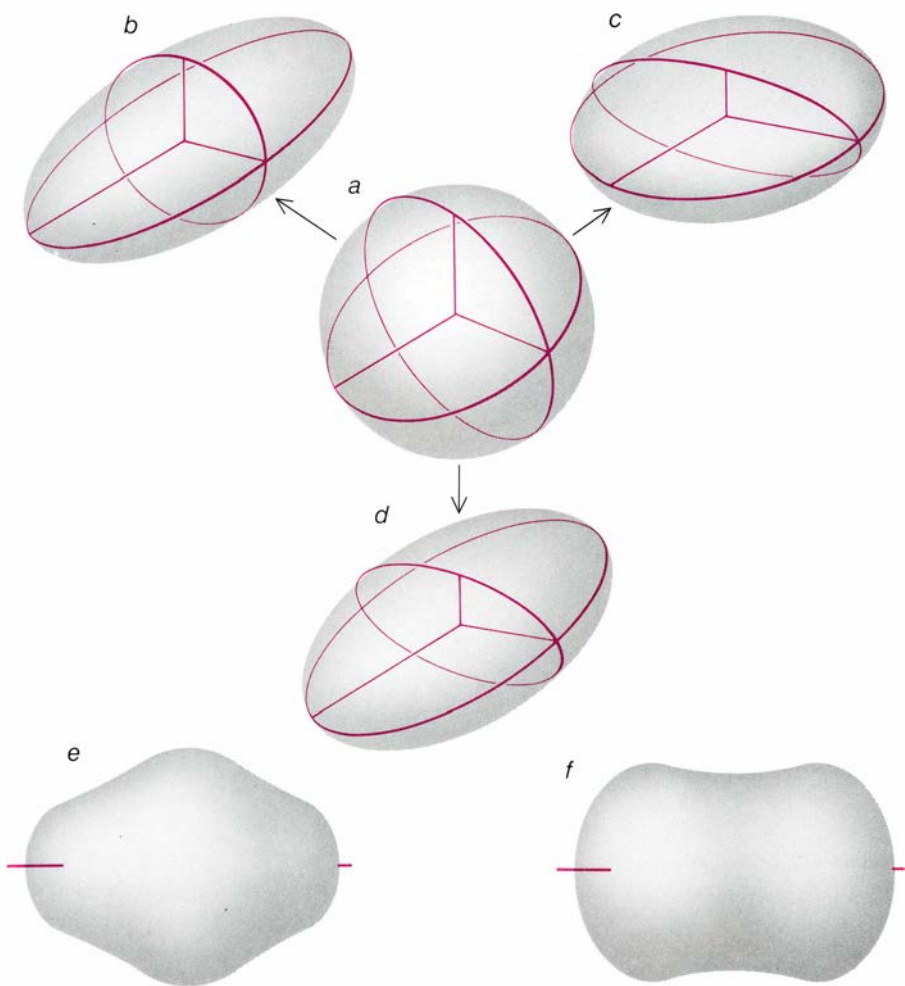
pio de exclusión de Pauli” impone que ningún neutrón pueda ocupar, en un núcleo, el mismo estado en que se asienta otro neutrón, y que ningún protón pueda ocupar un estado en el que haya otro protón. En virtud de ello, el núcleo se “construye” llenando una sucesión de estados con neutrones y otra sucesión de estados con protones, comenzando, en cada caso, por el estado que presenta menor energía.

Los estados tienden a aglomerarse en conjuntos. Los estados más energéticos de un conjunto, o capa, y los estados de menor energía de la capa superior siguiente están separados por un gran hueco energético. Aquí, la similitud entre la mecánica cuántica de los nucleones del núcleo y la de los electrones en órbita alrededor de éste resulta llamativa. Cuando, en un átomo, se ocupa entera una capa de electrones,

se obtiene un elemento químico inerte: helio, neón, argón, y así sucesivamente. En el núcleo, la situación es muy parecida: de acuerdo con el modelo de capas esféricas, al llenarse una capa nuclear, se obtiene un núcleo cuya esfericidad es “perfecta” o inalterable. De este modo, el modelo queda caracterizado por los números mágicos 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126 y 184. En el lenguaje de los físicos, estos números designan núcleos esféricos que poseen capas cerradas de neutrones o protones.

El modelo de capas esféricas establece, por consiguiente, ciertas categorías nucleares. Los núcleos que casan dos números mágicos esféricos (por ejemplo, el oxígeno 16, con 8 protones y 8 neutrones, o el plomo 208, con 82 protones y 126 neutrones) poseen una estabilidad especial en sus propiedades, en particular por lo que respecta a su forma esférica: son núcleos esféricos doblemente mágicos. Los núcleos que tienen un número mágico y, por ende, una capa cerrada, sea de neutrones o de protones, poseen una buena estabilidad y se consideran casi esféricos. Lo mismo puede decirse de los núcleos cuyo contenido de neutrones y de protones se aparta de un número mágico en sólo unos pocos nucleones. Por el contrario, de entre los núcleos deformes, los “más empecinados”, es decir, los que poseen una mayor estabilidad en sus propiedades, son aquellos que se encuentran más alejados de cualquier número mágico esférico: sus capas están a medio llenar, tanto en lo que respecta a los neutrones como a los protones. Los núcleos “suavemente deformados”, es decir, poco deformes, se asientan, en la tabla periódica, entre los núcleos esféricos y los deformes.

La segunda teoría avanzada para dar cuenta de la forma y estructura del núcleo atómico fue el modelo colectivo de deformación nuclear, propuesto, en 1952, por Aage Bohr y Ben Mottelson, del Instituto Niels Bohr de Copenhague. A grandes rasgos, introduce la mecánica cuántica en la primitiva interpretación del núcleo como una especie de gotita líquida de materia nuclear. En ese modelo colectivo, se imagina que la gota podría, en principio, adquirir cualquier forma; se calcula, entonces, en el marco de la mecánica cuántica, la energía que corresponde a cada forma y a las desviaciones de ésta. Ocurre que algunos núcleos llevan asociado un esquema tal que la energía alcanza su mínimo para un grado de deformación particular, al tiempo que aumenta



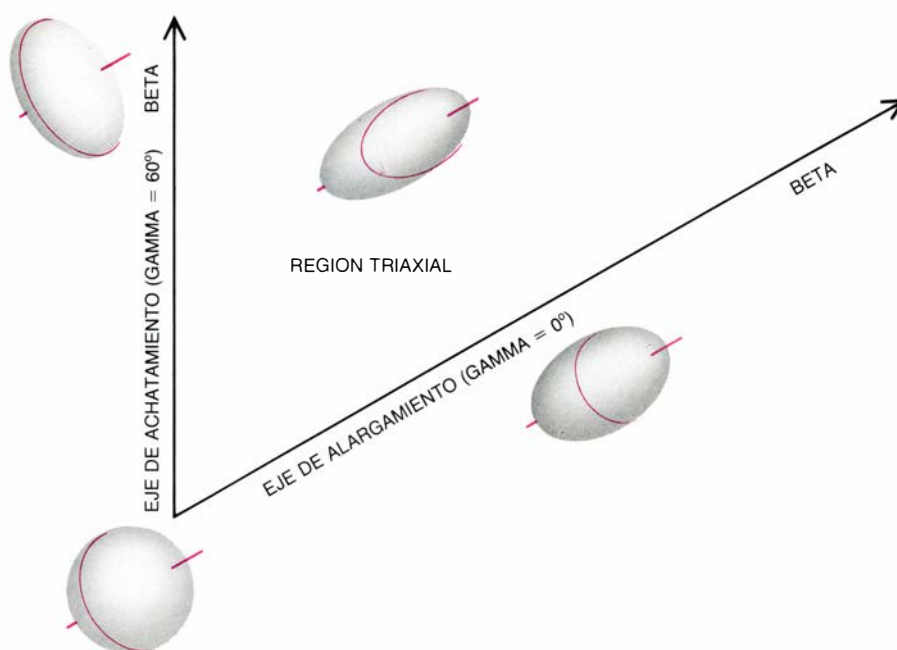
2. AMPLIA GAMA DE FORMAS de los núcleos. Para los esferoides (arriba), cada forma queda descrita por medio de las longitudes de tres ejes perpendiculares (líneas de color). En un núcleo esférico (a), los ejes son todos iguales. En uno esferoidal alargado, con forma de balón de rugby (b), uno de los ejes se extiende más que los otros dos, los cuales son iguales. En un núcleo esferoidal achatado, con forma de disco (c), uno de los ejes es más corto que los otros dos, iguales. En un núcleo triaxial (d), los ejes son todos desiguales. Algunos núcleos manifiestan deformaciones adicionales, de orden superior, que complican sus formas. Entre ellos se cuenta el estado fundamental, de mínima energía, de los núcleos de uranio 234 (e) y hafnio 180 (f).

enormemente para cualquier desviación de la misma; tales núcleos son duros y deformes. Otros núcleos muestran un cambio muy pequeño en la energía para un amplio intervalo de deformaciones; tales núcleos son blandos.

El trabajo teórico empeñado en idear modelos de núcleo atómico se ha esforzado por avanzar de consuno con la investigación experimental. En una de estas técnicas, los investigadores anotan las energías de los rayos gamma y de otras partículas emitidas por los núcleos en estados excitados. El núcleo atómico absorbe y emite energía sólo en forma de cuantos, o unidades discretas. Cada absorción señala su transición a un estado de energía más elevada, mientras que cada emisión señala su transición a un estado de energía más baja. En cada estado, el núcleo posee una cantidad de energía y de momento angular específicas. Además, tiene una forma propia y es capaz de realizar rotaciones y vibraciones, o movimientos entre sus nucleones, asimismo peculiares. A partir de los datos anotados, pueden determinarse los niveles de energía del núcleo. El diagrama de niveles de energía resultante es, en esencia, una representación esquemática de lo que la naturaleza deja hacer al núcleo.

Con ello no queremos decir que los experimentos sean sencillos. A finales de los años sesenta el trabajo teórico había predicho más de 5000 núcleos, en tanto que ni siquiera se habían identificado 1600 y no llegaban a 400 de éstos los que habían sido objeto de examen suficiente, para conocer algunos, al menos, de sus niveles energéticos más bajos. El problema radicaba en que los núcleos atómicos inestables tienden a transformarse en núcleos más estables, lo que se pone de manifiesto por su resistencia a la desintegración radiactiva. En núcleos cercanos a la estabilidad, la energía disponible para tal transformación, mediante desintegración beta, es de menos de un millón de electronvolt (MeV); la vida media de un núcleo de este tipo se mide en meses o años. Para núcleos que están lejos de la estabilidad, la energía disponible es de 5 a 10 MeV y la vida media es de segundos, o incluso inferior.

En las postrimerías de los años sesenta, la investigación del panorama nuclear empezaba, pues, a exigir el estudio de los núcleos atómicos exóticos. El proyecto iba a ser difícil. En cada experimento tendrían que analizarse



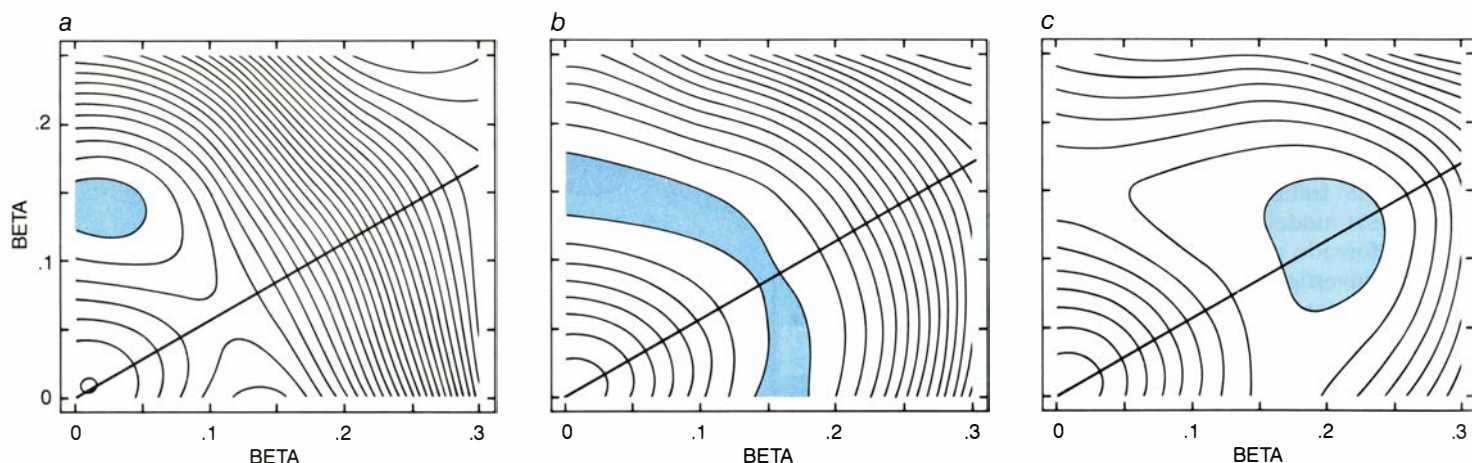
3. EL PLANO BETA-GAMMA constituye un esquema matemático para el rango de posibles formas de los núcleos esféricos; cada punto del plano corresponde a un valor de beta y a un valor de gamma y, en consecuencia, a una deformación particular de la esfera. Beta, que es un número igual o mayor que cero, mide el tipo de deformación que produce un esferoide oblongo al aumentar uno de los ejes de una esfera a expensas de los otros dos. Gamma, que es un ángulo que toma valores entre 0 y 60 grados, mide el tipo de deformación que convierte a un esferoide alargado en un esferoide triaxial al aplanar su sección circular. Si la deformación gamma se agranda, un esferoide alargado se transforma en un esferoide achatado.

datos de extraordinaria complejidad (las energías de cientos o incluso miles de rayos gamma), en busca de unas pocas transiciones nucleares que proporcionaran retazos de nueva información. Además, en cada experimento, los datos tendrían que recogerse muy deprisa, en ocasiones en no más de centésimas o milésimas de segundo después de la creación del núcleo. Los investigadores ardían en deseos por resolver estos problemas. Se esperaba obtener nuevas regiones de núcleos deformes, así como nuevos núcleos doblemente mágicos, tales como el estaño 100 (50 protones y 50 neutrones) o el estaño 132 (50 protones y 82 neutrones). Tales núcleos, ¿serían esféricos y “duros”? ¿Ocurriría, acaso, que los números mágicos esféricos que proporcionaban estructuras nucleares de capa cerrada perderían su carácter mágico en regiones de la tabla periódica alejadas de la estabilidad? ¿Serían allí distintos los números mágicos? ¿Mostrarían los núcleos de tales regiones nuevos tipos de deformación?

La solución de las dificultades experimentales asociadas con la producción y observación de núcleos atómicos exóticos llegó a través de un sistema acoplado de separación de isótopos (abreviado en ISOL: separador de

isótopos acoplado). Un blanco, generalmente una lámina metálica, sufría el bombardeo de una cara mediante un haz de partículas que emergían de un acelerador o de un reactor nuclear. Las partículas se fusionaban con los núcleos que se hallaban en el blanco. En la otra cara, los núcleos exóticos resultantes, que emergían propulsados desde el blanco, se sometían a la acción de un campo magnético intenso. Como los núcleos portaban carga eléctrica, eran desviados por el campo; el valor de la desviación dependía de su masa. Resultado de ello, una corriente continua de núcleos exóticos de vida corta podía dividirse en haces, formado cada uno de ellos por núcleos de una masa específica. Cada haz encerraba todavía cierto número de tipos distintos de núcleos, constituidos por combinaciones de un número de neutrones N y de un número de protones Z , cuya suma era el mismo número másico A . Los rayos X característicos que el núcleo de un elemento químico determinado emitía simultáneamente con otros modos de desintegración servían para identificar cada núcleo.

El primer proyecto a gran escala para estudiar los núcleos de la estabilidad por medio de un sistema ISOL fue emprendido, a finales de los años sesenta, en el CERN, el laboratorio euro-



4. SUPERFICIES DE ENERGÍA POTENCIAL; representan la energía de un núcleo en función de su forma. Se calculan suponiendo que el núcleo podría tomar una forma cualquiera. La privilegiada por la naturaleza será aquella a la que corresponda la menor cantidad de energía. Aquí, las superficies de energía potencial pertenecen al estado fundamental de los isótopos del platino, que van de los más estables a los puramente exóticos o inestables. Estos últimos contienen menor can-

tidad de neutrones que los núcleos de platino que se encuentran en la naturaleza. Cada representación sigue el esquema de la ilustración precedente: beta aumenta con la distancia desde el origen, la línea correspondiente a una gamma de 0 grados se eleva en diagonal y la línea correspondiente a una gamma de 60 grados constituye el eje vertical. El platino 192 (a), con su región de mínima energía (en color) confinada en torno al eje vertical, es achatado. Otro isótopo, el platino 118 (b), con

peo de física de partículas de Ginebra; ese proyecto de colaboración europea responde a las siglas ISOLDE. El dispositivo del CERN bombardeaba el blanco con un haz de protones de alta energía. En 1972, el UNISOR (separador de isótopos de la Universidad de Oak Ridge) comenzó a operar en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. El UNISOR, auspiciado por la Universidad Vanderbilt, integraba investigadores del Gobierno Federal norteamericano, el estado de Tennessee y algunas universidades; fue el primer proyecto importante en el que se empleaba un haz de iones pesados para determinar la estructura de los núcleos lejos de la estabilidad. Los consorcios ISOLDE y UNISOR han llevado a cabo estudios sistemáticos a gran escala que habrían resultado del todo imposibles para cualquier institución aislada.

Los patrones de niveles de energía disponibles en un núcleo, estable o exótico; se conocen lo suficiente para saber que el patrón correspondiente a un núcleo exótico recientemente creado basta para establecer si el núcleo es esférico o deforme, o si tiene múltiples “personalidades”: una forma casi esférica en alguno de sus estados y una morfología deforme en los demás. Es fácil dar con la pista de la esfericidad. El núcleo estable de níquel 62 nos ofrece un buen ejemplo [véase la figura 5]. Ello es debido a que la cantidad de energía que se requiere para elevar el níquel 62 de su estado fundamental a su primer estado excitado es grande: 1,17 MeV. En consecuencia, la energía ha provocado una vibración y no una rotación. (La energía requerida para

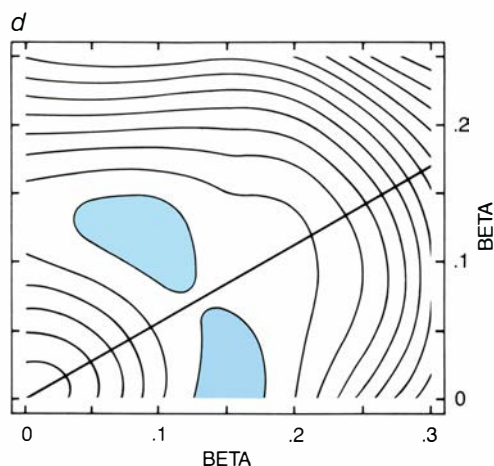
provocar una rotación suele ser inferior a 0,2 MeV.) Esta ausencia de rotación observable nos revela el carácter casi esférico del núcleo de níquel 62. Adviértase que el núcleo deforme puede girar, pero no el núcleo esférico. Dicho de otro modo, la mecánica cuántica afirma que la rotación de un núcleo en torno a un eje de simetría es indetectable, y en una esfera todo eje es un eje de simetría.

El diagrama de niveles de energía de un núcleo deforme es más complejo que el diagrama correspondiente a un núcleo esférico, aunque posee también ciertas características reveladoras. El diagrama correspondiente al núcleo estable gadolinio 154 constituye un ejemplo típico. Entre el estado fundamental y el primero de una serie de estados excitados muy juntos, se produce un vacío de sólo 0,123 MeV. Los estados excitados representan rotaciones cada vez más energéticas que recuerdan a un balón de rugby dando vueltas en torno a un eje perpendicular al de simetría. (En mecánica cuántica un núcleo oblongo puede girar en torno a un eje perpendicular al de simetría, mas no hacerlo en torno a este último. Precisamente porque se trata de un eje de simetría.) El patrón para el gadolinio 154 se completa con bandas de modos vibracionales del núcleo, combinándose cada modo con rotaciones en torno a un eje perpendicular al de simetría.

Además, hay núcleos que manifiestan la propiedad, recientemente reconocida, de poseer “personalidades” múltiples; es decir, coexisten formas distintas. En este aspecto, resultan

instructivos los isótopos del mercurio. Estables o exóticos, todos ellos tienen 80 protones, es decir, dos menos que 82, que es un número mágico esférico. Sobre esta base, podría esperarse que todos ellos ofreciesen niveles energéticos muy espaciados, característicos de los núcleos casi esféricos. Ciertamente, los isótopos que van del mercurio 198 al mercurio 192 muestran un patrón de este tipo. La verdad es que, a principios de los años setenta, el único signo de que algo extraño ocurría con los isótopos del mercurio fue el descubrimiento en ISOLDE por Ernst W. Otten y sus colegas, de la Universidad de Mainz, de la existencia de un sugestivo cambio de propiedades entre el mercurio 187 y el mercurio 185. Nuestras investigaciones, iniciadas en UNISOR en 1973, empezaron con el mercurio 190. También presentaba niveles de energía ampliamente espaciados. Sucedió entonces algo inesperado. Experimentos en el laboratorio Lawrence, de Berkeley, en el laboratorio nuclear de Chalk River y en UNISOR revelaron que el primer nivel energético excitado correspondiente a los isótopos progresivamente más ligeros, y por tanto cada vez más exóticos, mercurio 188, 186 y 184, indicaba un núcleo casi esférico. En contraste con ello, los niveles superiores mostraban una desviación hacia un patrón característico de un núcleo deforme. Sin embargo, los experimentos de Berkeley y de Chalk River medían únicamente las energías de algunos de los estados disponibles para el núcleo.

Nuestro trabajo en UNISOR completó los diagramas de niveles de energía. Los patrones resultantes mostraron que los núcleos de mercurio 188, 186 y



sus valores de mínima energía cubriendo todo el rango de valores de gamma, es un núcleo "blando", incapaz de conservar una determinada forma durante largo tiempo. El platino 180 (c), cuyos valores de mínima energía se sitúan en torno a la línea correspondiente a gamma igual a 0, es oblongo; el platino 176 (d), triaxial.

184 no cambian de una forma dura, con bajos niveles de energía, a otra forma dura, distinta, para los niveles altos. Cada núcleo posee doble personalidad: un conjunto completo de estados construido sobre un estado fundamental casi esférico y otro conjunto completo de estados, espaciados inicialmente en pequeñas diferencias de energía y, después, en valores cada vez mayores de la misma, característico de las rotaciones y vibraciones de un núcleo duro y deforme. Un nivel particular de energía del conjunto casi esférico está, en ocasiones, energéticamente muy próximo a un nivel perteneciente al conjunto deformado. Los datos confirman las predicciones teóricas realizadas ya en 1953, de acuerdo con las cuales en un núcleo pueden coexistir estados caracterizados por formas distintas. Tales predicciones se deben a David L. Hill, de la Universidad Vanderbilt, John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, Walter Greiner, de la Universidad de Frankfurt, y Vadim G. Soloviev, del Instituto Conjunto de Investigaciones Nucleares de Dubna, en la URSS.

Nuestro descubrimiento relativo a la coexistencia de formas en los isótopos del mercurio vino acompañado por un descubrimiento similar en el selenio 72 y en el selenio 74. Desde entonces, los descubrimientos de coexistencias de formas se han producido incluso en núcleos que tienen números mágicos protónicos, tales como el estaño 116 (50 protones) y el plomo 196 (82 protones). Hoy se sabe que la coexistencia de formas se extiende por toda la tabla periódica. El fenómeno establece un puente entre los núcleos

esféricos y los deformes, que parecían antes agrupar clases diferentes. Se está convirtiendo, pues, en un punto importante del desarrollo de una descripción unificada de la materia nuclear.

Como parte del esfuerzo que se está llevando a cabo para avanzar hacia ese marco teórico, el estatuto de número mágico —y con él, la potencia del modelo de capas esféricas— se está transportando a dominios que se hallan lejos de los que corresponden a los núcleos estables encontrados en la naturaleza. En este contexto han ido cosechándose una serie de hallazgos notables en la zona de la tabla periódica correspondiente a Z menor que 50. En esta región, ningún núcleo puede estar muy lejos de por lo menos un número mágico esférico: 2, 8, 20, 28, 40 o 50. Por esa razón, el descubrimiento de coexistencia de formas en el selenio 72 (34 protones y 38 neutrones) y en el selenio 74 (34 protones y 40 neutrones) resultó del todo inesperado. Y constituyó una sorpresa adicional el hecho de que los núcleos exóticos con una cifra de protones y de neutrones cercanas ambas al número mágico 40 mostrasen poseer las mayores deformaciones del estado fundamental jamás observadas. Una colaboración entre investigadores de Vanderbilt, Oak Ridge, Universidad de Colonia, Instituto Central de Investigaciones Nucleares, cerca de Dresde, e Instituto de Física Moderna de Lanzhou, en China, posibilitó el descubrimiento de dos de tales núcleos: el kriptón 74 (36 protones y 38 neutrones) y el kriptón 76 (36 protones y 40 neutrones). El equipo de ISOLDE encontró un tercero: el estroncio 100 (38 protones y 62 neutrones).

Hay, cuando menos, dos motivos para denominar superdeformes a tales núcleos. La magnitud de una deformación nuclear está especificada por el parámetro beta, que viene a corresponder a la diferencia de longitud existente entre el eje largo y el eje corto de un núcleo, dividida por el valor medio de estos dos ejes. Los núcleos casi esféricos tienen un valor pequeño de beta, digamos 0,1, mientras que los núcleos deformes típicos tienen valores entre 0,2 y 0,25. El valor de beta para un núcleo superdeforme en su estado fundamental está entre 0,35 y 0,4.

La justificación que termina de corroborar tal denominación proviene de la energía del primer nivel excitado que, como se ha dicho anteriormente, surge de las rotaciones en un núcleo deforme. Cuanto mayor es la deformación, menor es la energía del primer estado excitado. Cuando los valores

medidos se normalizan según las distintas masas de los núcleos, los núcleos deformes de los actínidos, cuyas Z están alrededor de 90, poseen energías de primer estado excitado entre los 43 y 45 keV (1 keV = mil electronvolt). Antes del descubrimiento del núcleo superdeforme, el menor valor conocido —42,8 keV— correspondía al primer estado excitado del núcleo actínido plutonio 240. El núcleo superdeforme estroncio 100 tiene una energía normalizada de primer estado excitado de 30 keV, el núcleo superdeforme kriptón 74 posee una energía normalizada de primer estado excitado de 28 keV.

Al mismo tiempo que se iban descubriendo los núcleos superdeformes, los cálculos teóricos estaban prediciendo su existencia. En 1981, Peter Möller, de la Universidad de Lund, en Suecia, y J. Rayford Nix, de los Alamos, calcularon la energía potencial mínima para un número dado de protones y de neutrones y dedujeron las masas y las formas correspondientes a los estados fundamentales de más de 4000 núcleos. Este trabajo debe considerarse parte de un proyecto de más largo alcance, iniciado en 1955 cuando S.G. Nilsson, de la Universidad de Lund, calculó los niveles de energía de los distintos nucleones de un núcleo deforme; trabajo que continuaría en 1984, cuando Möller y Nix, junto con Ragnar Bengtsson, de Lund, y Jingye Zhang, del Instituto Lanzhou de Física Moderna, rehicieron los cálculos empleando un modelo más detallado para la fuerza que actúa entre los nucleones.

Las predicciones de 1981 corroboraron elegantemente el significado de los números mágicos y esféricos establecidos. En concreto, los cálculos mostraban que, tratándose de núcleos esféricos, aparecían vacíos significativos entre niveles energéticos sucesivos, correspondientes a las partículas individuales, para los números mágicos aceptados. Sin embargo, para deformaciones grandes surgió un nuevo e inesperado vacío correspondiente al número 38. En consecuencia, un núcleo con una N o una Z próxima a 38 experimentaba, aparentemente, lo que podríamos llamar proclividad hacia la deformación. La deformación sería aún más manifiesta si recibiera el favor conjunto de neutrones y protones del núcleo. Möller y Nix predijeron así que los núcleos cercanos a una N y a una Z de valor 38 deberían estar entre los más resueltamente deformes de la naturaleza. La superdeformación del kriptón 74 (36 protones y 38 neutrones) con-

firma sólidamente esta predicción. Para el estroncio 100 (38 protones y 62 neutrones), la situación es muy parecida. Tal como uno de los autores (Hamilton) puso de manifiesto, el número de neutrones 60 es un número mágico deforme, siempre y cuando se vea reforzado por otro número mágico deforme. Por tanto, lo mismo en el caso del estroncio 100 que en el del kriptón 74, la superdeformación del núcleo resulta del esfuerzo conjunto obtenido por la proximidad a un par de números mágicos deformes: 38 y 38, o 38 y 60.

La situación se ve afectada, sin embargo, por la proximidad del número mágico esférico 40 al número mágico deforme 38. En particular, 40 es un número mágico esférico para N o para Z si su impulso hacia la esfericidad se ve reforzado por un impulso hacia la esfericidad por parte del otro tipo de nucleón que hay en el núcleo. Así, el circonio 90 (40 protones y 50 neutrones) tiene el carácter de doblemente mágico y esférico, e igual ocurre con el núcleo exótico, recientemente descubierto, níquel 68 (28 protones y 40 neutrones). Si no hay ningún impulso adicional hacia la esfericidad, el número deforme 38 puede ser el dominante. El hecho de que las proporciones Z/N de valores 38/40, 36/40 y 38/60 den lugar a notables deformaciones indica que el número deforme 38 es más mágico —más importante— que el número esférico*40. Los investigadores están buscando afanosamente los núcleos exóticos estroncio 76 (38 neutrones y 38 protones) y el circonio 80 (40 neutrones y 40 protones). Hasta el presente no se ha descubierto ninguno de los dos, a pesar de los esfuerzos empeñados.

El grupo de Vanderbilt está intrigado por dos isótopos de bromo. El bromo 73 (35 protones y 38 neutrones) debería ser superdeforme y oblongo como el balón de rugby, mientras que el bromo 71 (35 protones y 36 neutrones) debería constituir el primer descubrimiento de un núcleo deforme y achatado, o sea, con forma de disco. Los trabajos de Bengtsson, Möller, Nix y Zhang sitúan el valor 35 para N y Z en el centro de una región de superdeformación achatada.

Entre tanto, los investigadores continúan inspeccionando el panorama nuclear. Una técnica bastante utilizada consiste en representar la superficie de energía potencial, poniendo la energía interna de un núcleo dado en función de su forma. Esta técnica parte de la hipótesis de que, en principio, todo nú-

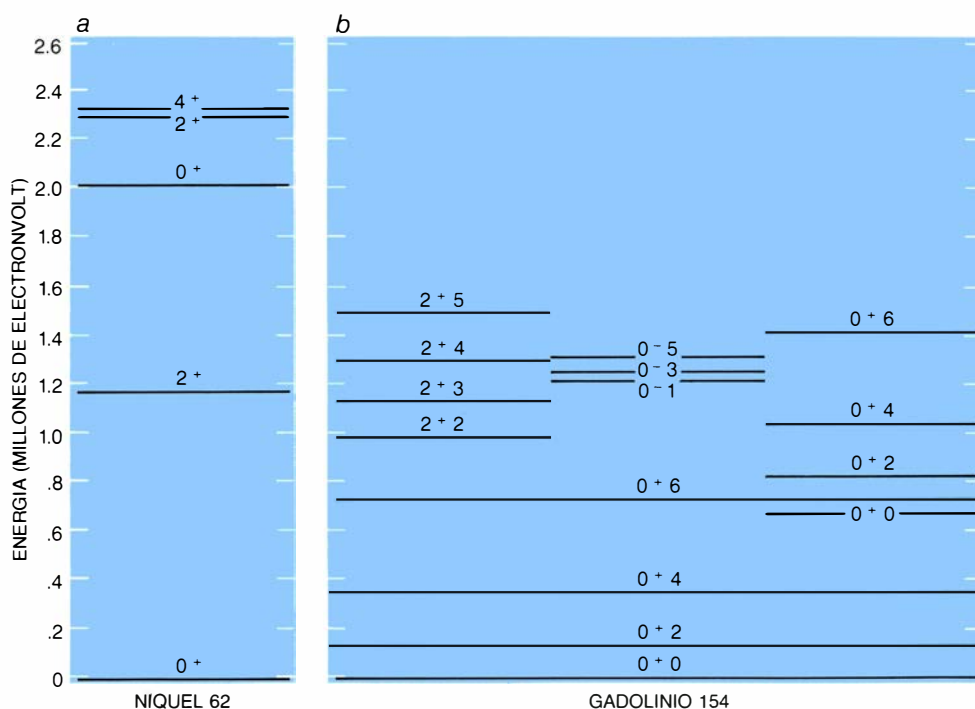
cleo, sea exótico o estable, podría adoptar cualquier forma; todas requieren cierta cantidad de energía. El núcleo favorecerá la forma que precise la mínima cantidad de la misma.

Para comenzar, debe fijarse un procedimiento matemático con el fin de caracterizar las diversas formas posibles. Imaginemos un balón de rugby situado sobre una mesa de modo que su eje más largo, que va de un extremo al otro del balón, sea horizontal. La sección transversal del balón (corte vertical a través del centro del balón, equidistante de ambos extremos) es circular. En otras palabras, los dos ejes más cortos del balón de rugby son iguales, mientras que el tercer eje es más largo. Tales formas son esferoides alargados. Imaginemos ahora que el eje largo se acorta, mientras que la sección circular se expande. El resultado final será que el balón tendrá entonces dos ejes largos iguales y el tercero será más corto. En pocas palabras, el balón se habrá transformado en un disco. Tales formas son esferoides achatados. Finalmente, imaginemos que comprimimos entonces el balón de rugby hasta conseguir que su sección transversal sea una elipse, en vez de un círculo. Ahora los tres ejes presentan longitu-

des distintas. Tales esferoides se denominan triaxiales.

¿Cómo expresar estas diferencias en términos matemáticos? Existe un sistema introducido por Bohr y Mottelson que se basa en dos parámetros, beta y gamma [véase la figura 3]. Intuitivamente, beta (mencionada ya más arriba, en relación con los núcleos superdeformados) es una medida de la deformación que convierte a un balón de fútbol en un balón de rugby (esferoide oblongo) por alargamiento de uno de sus ejes. Una esfera perfecta tiene beta igual a 0. Gamma (que es un ángulo) mide la deformación que convierte a un esferoide oblongo en triaxial, al deformar su sección circular. Una gamma igual a 0 corresponde a un esferoide oblongo, o alargado. A medida que gamma aumenta, uno de los ejes cortos del esferoide crece a expensas de los otros dos, de modo que, al final, resulta que los tres ejes tienen longitudes distintas: el esferoide se ha transformado en triaxial. Cuando gamma se acerca a los 60 grados el eje que crece se va haciendo igual al eje que era más largo; y el esferoide se torna plano, como un disco, es decir, se convierte en achatado.

En suma, toda forma posible de un núcleo corresponde a valores dados de



5. EN LOS DIAGRAMAS DE NIVELES ENERGÉTICOS se representan las cantidades cuantizadas de energía que un núcleo absorbe o emite en el curso de su transición de un estado a otro. Cada diagrama ofrece pistas para averiguar ciertas propiedades nucleares, la forma entre ellas. El níquel 62, que es un isótopo estable (a), posee un núcleo casi esférico. El gran vacío energético que existe entre el estado fundamental, 0^+ , y el primer estado excitado, que se designa por 2^+ , indica que la energía ha alimentado las vibraciones de una esfera. El gadolinio 154, un isótopo estable de un elemento de las llamadas tierras raras (b), tiene un

beta y gamma y, por consiguiente, a un punto de una banda en lo que los matemáticos denominarían el plano beta-gamma. Las cantidades de energía que se requieren para conseguir que el núcleo adquiera una de las diversas formas posibles definen una superficie: la superficie de energía potencial. Supongamos que cierto núcleo alcanza el mínimo de su superficie de energía potencial para beta igual a 0, y que la energía aumenta en picado para cualquier desviación hacia una forma distinta de la correspondiente a beta igual a 0. Tal núcleo sería esférico en su estado fundamental y cualquier desviación de su forma esférica engendraría una fuerza restauradora. Por consiguiente, el núcleo mostraría vibraciones en torno a su forma esférica.

Existe un segundo tipo de núcleos en los que se obtienen el mínimo de la superficie de energía potencial para un valor de beta distinto de cero, y sobre la línea correspondiente a una gamma de 0 grados, o sobre la línea para la que gamma vale 60 grados. Estos núcleos son deformes: en su estado fundamental, son oblongos (para gamma igual a 0 grados), o bien achatados (para gamma igual a 60 grados). Su modo de excitación principal es una

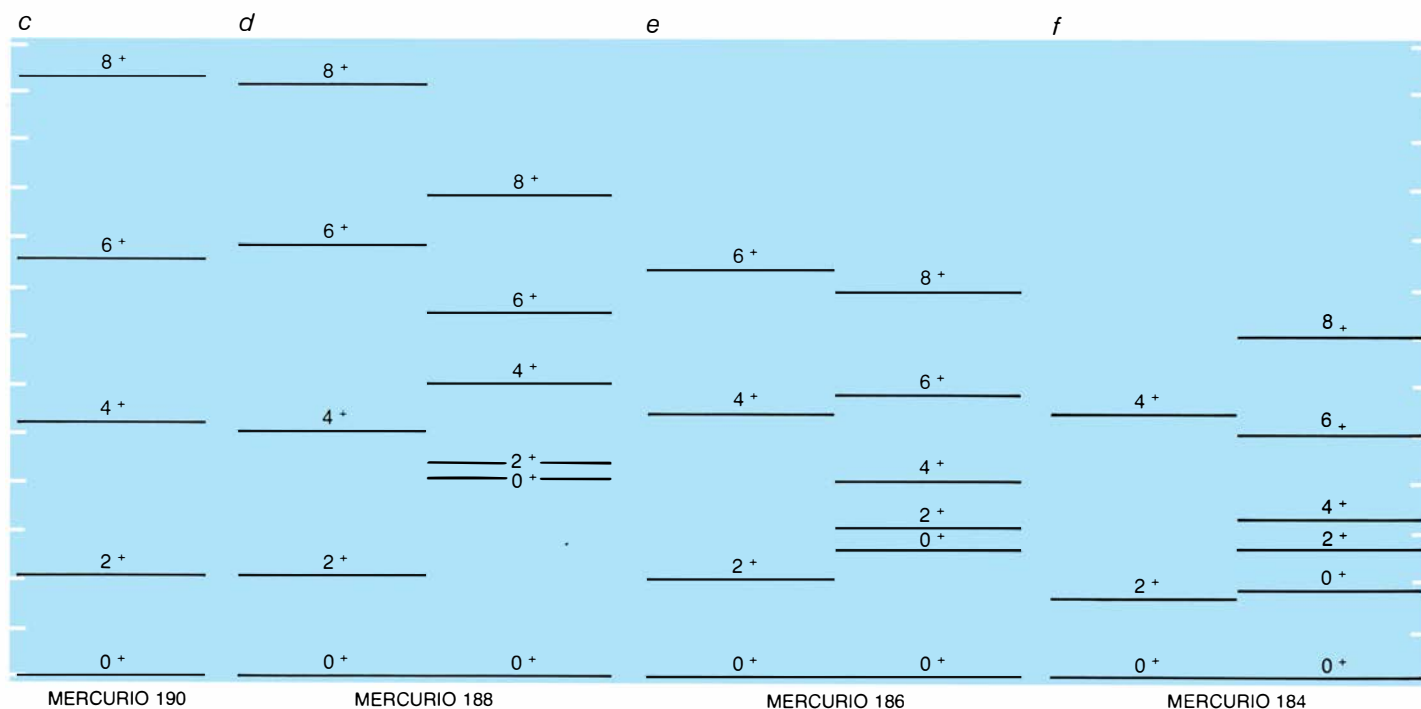
rotación en torno a un eje que no es de simetría. Sin embargo, tales núcleos pueden vibrar también en torno a su forma de equilibrio. Y, a su vez, cada modo de vibración puede dar soporte a toda una banda de estados rotacionales.

La tercera clase de núcleos se distingue por poseer el mínimo de superficie de energía potencial para un valor de beta distinto de 0 y para un valor de gamma distinto de 0 grados y de 60 grados; es decir, un mínimo en la región triaxial del plano beta-gamma. Para estos núcleos, la representación pierde claridad y se hace más difícil identificar la forma precisa del núcleo. Si el núcleo está bastante cerca de uno de los casos límite representados por los dos primeros tipos de núcleos, el patrón revelado por el diagrama de niveles de energía puede ayudar a determinar propiedades del núcleo tales como la magnitud de su deformación y la naturaleza de sus excitaciones vibratorias.

Greiner y sus colegas de Frankfurt han desarrollado un método elegante para construir la superficie de energía potencial a partir de las medidas de los niveles de energía de un núcleo dado. A su vez, las superficies de energía potencial constituyen un medio excelente para comparar las propiedades de una

serie de isótopos exóticos de un elemento químico [véase la figura 4]. Muy recientemente, algunos grupos, entre ellos uno de Lund y otro de Oak Ridge, han llevado a cabo cálculos sistemáticos de las superficies de energía potencial correspondientes a núcleos de varias regiones de la tabla periódica. El poder predictivo de tales trabajos es impresionante. Por ejemplo, se avanzó con éxito la coexistencia de formas para el platino 176. Los cálculos están considerando la posibilidad de que la constelación de protones y la constelación de neutrones de un núcleo vibren una respecto de la otra, de manera que el núcleo tenga una deformación distinta para los protones y para los neutrones. Tales modos de vibración fueron introducidos por Greiner en 1965, y ejercen una influencia destacada sobre el momento magnético nuclear, que mide el flujo de carga eléctrica creado por el movimiento de los protones. Las vibraciones propiamente dichas acaban de descubrirse.

Existen dos aspectos de los núcleos atómicos exóticos a los que aún no hemos hecho justicia. El primero: un núcleo puede ser exótico (es decir, diferir sustancialmente de los núcleos que se hallan en la naturaleza) por presentar un momento angular muy superior. El



núcleo deforme. El pequeño vacío energético que existe entre su estado fundamental, 0⁺, y su primer estado excitado, 0⁺2, indica que la energía ha alimentado las rotaciones de un esferoide oblongo en torno a un eje perpendicular a su eje de simetría. El resto del esquema está constituido por estados que representan modos vibratorios superpuestos a rotaciones en torno a un eje perpendicular al de simetría. El mercurio 190 (c) muestra los niveles espaciados de un núcleo

más o menos esférico. En cambio, los isótopos progresivamente más exóticos mercurio 188 (d), mercurio 186 (e) y mercurio 184 (f) poseen doble "personalidad": un conjunto de niveles espaciados que revelan una forma esférica y un conjunto interfoliado de niveles, mucho menos espaciados, reveladores de una forma oblonga. Los números que acompañan a cada nivel designan valores cuantizados de determinadas propiedades nucleares, tales como el espín.

momento angular es una medida de la rotación del núcleo o de los movimientos de sus nucleones componentes. Investigadores del Laboratorio Lawrence de Berkeley, del Laboratorio Nacional de Argonne, de Oak Ridge, de la Asociación para la Investigación de Iones Pesados (GSI) de Heidelberg y del Laboratorio Daresbury, en Inglaterra, han detectado rayos gamma que emanaban de estados nucleares con momentos angulares de 40 unidades y más. (En mecánica cuántica, el momento angular se mide en múltiplos de una cantidad llamada constante de Planck.)

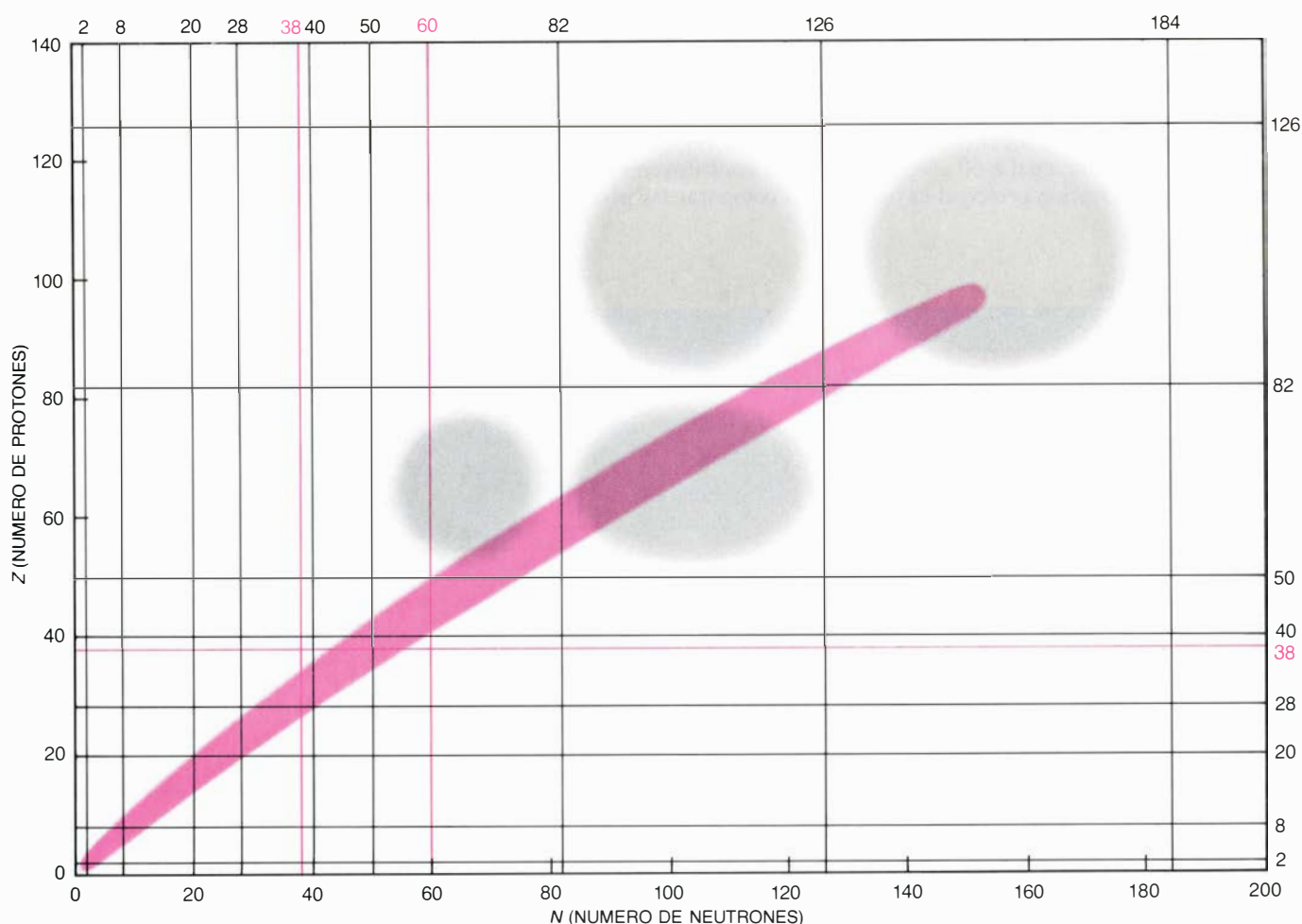
Los estados comúnmente observados en los núcleos presentan momentos angulares de unas seis unidades. Cuando el momento angular de un núcleo aumenta, se destruye la permanencia de su forma. En efecto, incluso en los mejores ejemplos de núcleos esféricos duros o de núcleos deformes duros se ob-

tienen múltiples cambios. El penúltimo resultado es la superdeformación; después, el núcleo se fragmenta por fisión nuclear.

Vayamos con el segundo aspecto hasta ahora abandonado: ciertos núcleos lejos de la estabilidad han mostrado muchos nuevos modos exóticos de desintegración radiactiva. En los núcleos ricos en neutrones (es decir, en núcleos que tienen muchos más neutrones que los del núcleo estable, para una Z dada), una emisión beta puede dejar al núcleo en un estado excitado tan alto que emita un neutrón en vez de un rayo gamma (que es la manera usual de “eliminar” energía). Esta radiactividad en dos etapas fue identificada por E.T. Booth y John R. Dunning, de Vanderbilt, y por Francis G. Slack, de la Universidad de Columbia. En núcleos extremadamente ricos en neutrones, Born Jonson, P. Greggers Hansen y

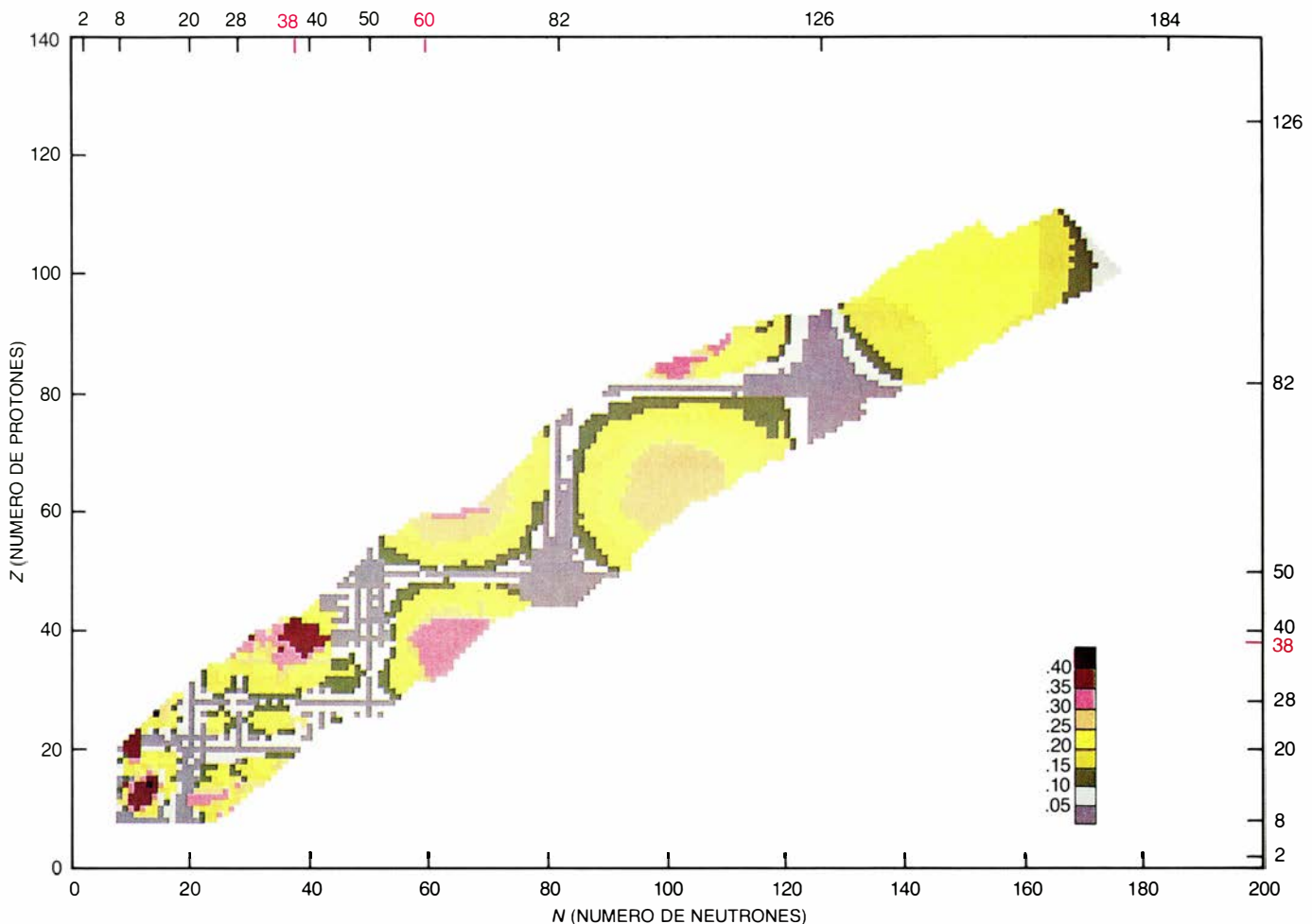
sus colegas, de ISOLDE, han descubierto emisiones de dos neutrones y emisiones de tres neutrones subsiguientes a una emisión beta. Se han predicho, además, emisiones radiactivas de uno y dos neutrones en núcleos exóticos que se encuentran en su estado fundamental, pero tales emisiones no se han observado aún.

Los núcleos ricos en protones también han dado lugar a descubrimientos interesantes. V.A. Karnoukhov, del Instituto Conjunto para Investigaciones Nucleares de Dubna, descubrió emisión de protones subsiguiente a la emisión beta. En este caso, el núcleo libera un positrón (partícula subatómica idéntica al electrón, excepto en su carga, que es positiva) y, a continuación, en un estado excitado, emite un protón. Más recientemente, en el Laboratorio Lawrence de Berkeley, se ha descubierto la emisión radiactiva de dos protones subsiguiente a la emisión



6. SE ENTIENDE POR NUMEROS MAGICOS las cantidades de neutrones o de protones que llenan “capas” de un núcleo, confiriendo estabilidad a la forma esférica del mismo. Aquí cada número mágico esférico se representa por una línea negra que cruza un diagrama en el que se describe la cantidad de protones en el núcleo (eje vertical) en función de la cifra de neutrones (eje horizontal). Los núcleos estables que se hallan en la naturaleza ocupan una región (en color) que se extiende en diagonal hacia arriba, partiendo del núcleo más ligero, el hidró-

geno 1; la región incluye algunos núcleos “doblemente mágicos y esféricos”, así el núcleo de oxígeno 16 (8 protones y 8 neutrones). Los núcleos que poseen una cantidad de protones y de neutrones que está lejos de cualquier número mágico esférico deberían ser deformes; en ciertas regiones (en gris), tal deformación se ha encontrado. El estudio de los núcleos atómicos exóticos ha revelado la existencia de tres números mágicos deformes, representados aquí mediante líneas de color; estos números confieren estabilidad a una forma del núcleo no esférica.



7. FORMAS PREDICHAS para el estado fundamental de 4023 núcleos, que van desde el núcleo de oxígeno 16 hasta un núcleo con 279 nucleones (102 protones y 177 neutrones); en esta gráfica, se dibuja beta (el parámetro que corresponde a la desviación del núcleo de la esfericidad) en función del número de neutrones y del número de protones. Los núcleos cuya desviación de la esfericidad se predice mínima (*en gris*) tienden a concentrarse encima de las líneas trazadas por los números mágicos esféricos, o junto a las mismas. Los núcleos

que se predice son los más deformes en la naturaleza (*en marrón*) ocupan cierto número de bolsitas, entre las que se encuentra una que constituye una predicción correcta de la superdeformación que se ha descubierto en núcleos exóticos tales como el kriptón 74 (36 protones y 38 neutrones.). Las predicciones fueron elaboradas por Peter Möller, de la Universidad de Lund, en Suecia, y J. Rayford Nix, del Laboratorio Nacional de Los Alamos; sus cálculos se basaron en una representación matemática de la fuerza que mantiene unidos a los nucleones.

beta. La emisión alfa subsiguiente a una emisión beta (es decir, la emisión de un positrón continuada por la emisión de lo que equivale a un núcleo de helio 4) se conoce desde hace tiempo. En ISOLDE se acaba de hallar la emisión de un núcleo de hidrógeno 3 subsiguiente a la emisión beta. La radiactividad protónica en el estado fundamental la descubrieron dos grupos del GSI de Darmstadt, si bien cada uno por su cuenta. La emisión radiactiva de dos protones, predicha por la teoría, pero no se ha observado todavía.

Algunos de los modos de emisión descubiertos recientemente llaman la atención. Greiner y sus colegas de Frankfurt y del Instituto Central de Física de Bucarest adelantaron, en 1980, que podrían emitirse en una desintegración radiactiva conglomerados nucleónicos tan pesados como los equivalentes al núcleo de carbono 14 o al

núcleo de neón 24, siempre que el proceso produjese como resultado un núcleo hijo doblemente mágico, tal como el plomo 208 (82 protones y 126 neutrones), o un núcleo muy próximo a otro doblemente mágico. La predicción se confirmó hace dos años. La emisión de carbono 14, detectada en el radio 223, en la Universidad de Oxford, se ha confirmado ya en varios nucleones; la emisión de neón 24 se ha detectado en el uranio 232 y en el isótopo protoactinio 231.

Hay pruebas cada vez más sólidas de la existencia de tales conglomerados en estados excitados, e incluso en los estados fundamentales de núcleos pesados. Los descubrimientos pueden conducirnos, por tanto, a una comprensión mayor de la organización de los nucleones en el interior del núcleo atómico. A su vez, un conocimiento mayor de los movimientos colectivos de los nucleones dentro del núcleo debería

proporcionarnos una nueva perspectiva del problema general que representan los sistemas formados por partículas subatómicas.

Una de las razones principales que llevan a estudiar todos los aspectos de la estructura nuclear se apoya en el hecho de que el núcleo atómico constituye el mayor, o tal vez el único, campo de pruebas para toda una gavilla de problemas mecánico-cuánticos intermedios de muchos cuerpos, es decir, de sistemas que contienen un número intermedio de partículas: corto para tratarlas mediante procedimientos estadísticos y excesivo para abordarlas fácilmente una a una. Queda todavía mucho por hacer, tanto desde el punto de vista experimental como desde el punto de vista teórico, sobre todo si las formas y los movimientos que se están observando en los núcleos atómicos exóticos nos han de proporcionar todo el conocimiento que prometen.

Percepción del espacio y el tiempo por el sentido del tacto

Ligeras variaciones en la frecuencia de golpes sobre la piel producen amplias fluctuaciones en la percepción de las localizaciones de los mismos. ¿Qué relación puede guardar esto con el funcionamiento del sistema nervioso central?

Frank A. Geldard y Carl E. Sherrick

Hay un juego de salón que consiste en que una persona (el sujeto se le denominaría en un experimento psicológico) mantiene cerrados los ojos mientras otra punza su brazo suavemente con un lápiz. El sujeto debe indicar, a continuación, dónde le han golpeado. Casi invariablemente, señala un punto algo alejado del lugar real de contacto. Durante más de diez años hemos venido realizando ensayos, en nuestro laboratorio de la Universidad de Princeton, que pudieran considerarse variaciones controladas de ese juego.

Partimos del conocimiento de que los sentidos humanos se han ido adaptando diversamente al espacio y al tiempo. No poseen la misma preparación a la hora de habérselas con estas dos principales magnitudes del mundo físico. Aunque el sentido de la vista domina ya muchos de los intrincados perfiles del espacio, resulta bastante indolente en lo que concierne al tiempo. Pensemos, por ejemplo, en el modo en que los fotogramas discretos de una película, proyectados sobre la pantalla a un ritmo de 24 imágenes por segundo, se disuelven en una acción percibida como algo uniforme y continuo. La audición domina el manejo del tiempo, pero la información que aporta sobre el espacio resulta indirecta y a menudo defectuosa. Un sonido que se origine en un punto del plano medio del cuerpo tendrá casi las mismas probabilidades de percibirse produciéndose en su parte anterior o produciéndose en su parte posterior. Los sentidos del olfato y el gusto contribuyen muy poco a la formación de acotaciones espaciales y temporales, respondiendo con relativa lentitud a las alteraciones químicas del medio ambiente.

¿Y qué decir del tacto? Guarda una estrecha relación con el espacio y con el tiempo, si bien no se distingue por su

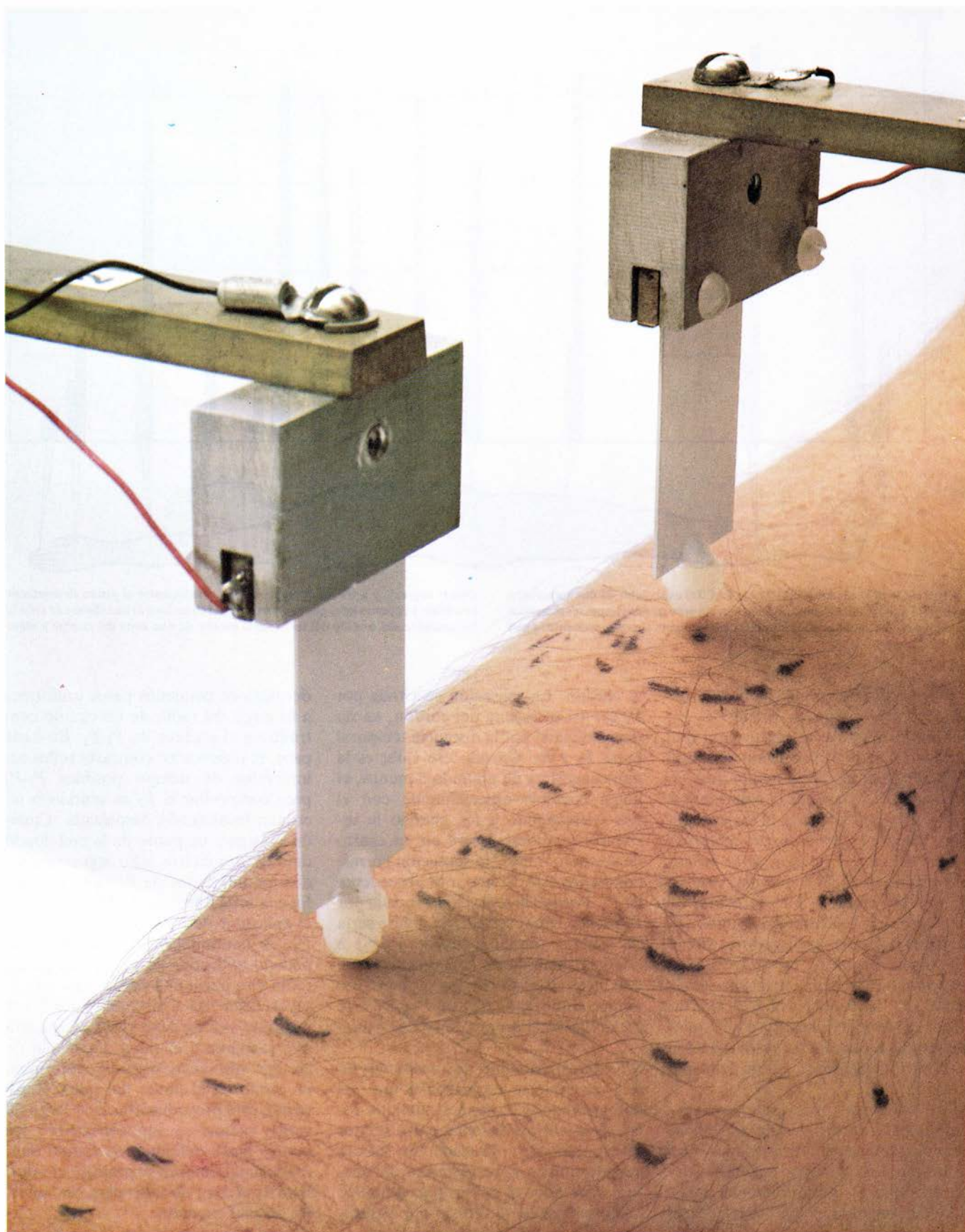
dominio de ninguno de los dos. La piel, que aventaja al oído en lo concerniente a la discriminación espacial y gana al ojo en lo referente a la discriminación temporal, no puede competir con el ojo en la representación del espacio, ni con el oído en el cálculo del intervalo de tiempo transcurrido entre dos estímulos. El tacto, única modalidad sensorial de amplia distribución por todo el cuerpo, ocupa una posición intermedia en la jerarquía de los sentidos. En cierto modo análogo, a grandes rasgos, a lo que sucede en la retina del ojo, la piel es capaz de informar sobre el punto dónde se la está presionando, sobre la distancia entre dos estímulos distinguibles, sobre cuáles son las formas o configuraciones con las que está estableciendo contacto y sobre si se está moviendo por su superficie. No obstante, todas estas facultades van acompañadas de errores.

A la hora de emprender estos experimentos, pretendíamos ahondar en el conocimiento del sentido del tacto, incluida su falibilidad característica. Nos pareció bien modificar algunas normas del juego de salón, entre ellas las relativas al número y la frecuencia de los contactos. Nuestros ensayos demostraron que el error en la localización de un golpecito sobre la piel con respecto a una segunda presión fluctúa ampliamente en cuanto se varía lo más mínimo la frecuencia de los mismos. Este resultado y otros han sacado a la luz algunos datos sobre la organización del sistema nervioso; y han permitido definir un fenómeno, que denominamos salto, que continúa esperando una explicación adecuada.

El experimento básico consiste en producir tres golpes suaves sobre la piel de un sujeto. Para provocar esos golpes, simbolizados por P_1 , P_2 y P_3 , se utilizan unos aplicadores piezoeléctri-

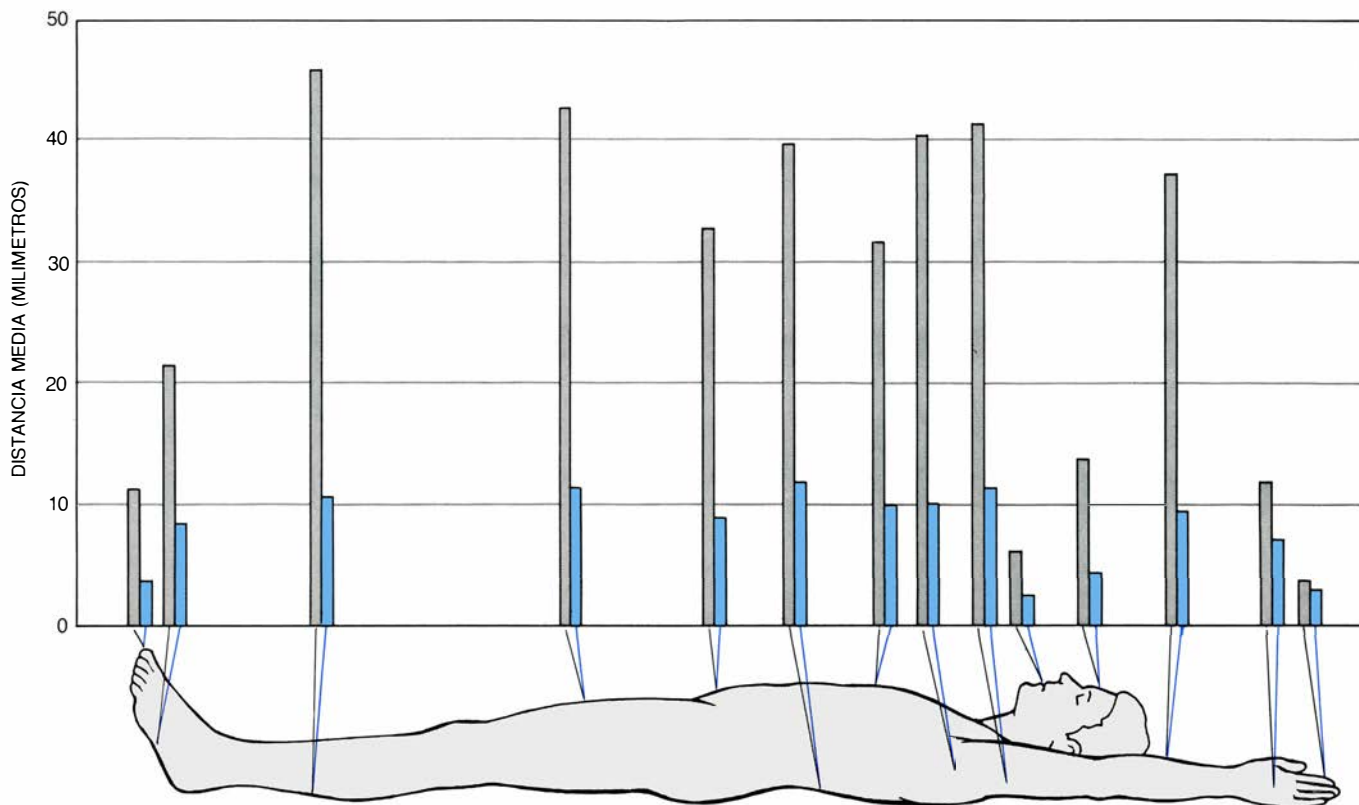
cos cutáneos que se doblan o flexionan en respuesta a pulsos de electricidad. El impacto inicial (P_1) precede a los otros casi un segundo entero; no solamente avisa de la proximidad de dos golpes más, sino que sirve de punto topográfico en virtud del cual puede detectarse cualquier desplazamiento de la localización percibida. El segundo y tercer golpe (P_2 y P_3 , respectivamente) son aplicados en rápida sucesión. El primero de este par se aplica en el mismo punto que el precursor P_1 ; el segundo, emitido por un aplicador cutáneo diferente, se produce a cierta distancia. De ahí que P_1 y P_2 determinen un punto de estímulo y P_3 determine otro. Las relaciones temporales entre los tres golpes llevan asociada una espera larga y constante entre P_1 y P_2 y otra breve y variable entre P_2 y P_3 .

Tal como cabe suponer, siempre que el experimento se disponga de suerte que los golpes se den en el antebrazo mediante dos aplicadores cutáneos distantes entre sí unos 10 centímetros, y siempre que el tiempo transcurrido entre P_2 y P_3 sea de un cuarto de segundo o más, se comprobará que el sujeto siente dos golpes consecutivos (P_1 y P_2) en el mismo punto, seguidos de otro (P_3) en un punto alejado de los dos anteriores. (Debido al error normal de localización del contacto, los puntos sentidos no tienen por qué coincidir con los lugares donde realmente se ha aplicado la presión; se encuentran, eso sí, dentro del radio normal de error.) Sin embargo, cuando se reduce el intervalo entre P_2 y P_3 a menos de un cuarto de segundo, sucede algo inesperado: el sujeto deja de sentir P_2 en su punto "verídico", es decir, donde antes sintió P_1 . Ahora P_2 pasa a ser percibido aplicado en alguna posición intermedia entre los puntos correspondientes a P_1 y P_3 . El último golpe parece haber "tirado" del segundo hacia él.



1. APLICADORES PIEZOELECTRICOS CUTANEOS diseñados por los autores para sus experimentos sobre la sensación táctil, se doblan transitoriamente al recibir un pulso eléctrico. La punta del aplicador descansa sobre la piel, ejerciendo una presión estática que puede regularse colocando un peso al otro extremo del brazo de palanca de latón a la que está sujeto el aplicador. A continuación puede superponerse un patrón de golpecitos suaves sobre esta presión "de base" mediante una secuencia programada de pulsos eléctricos. En el ex-

perimento fundamental, un aplicador produce un golpe de aviso y referencia (denominado P_1), seguido un octavo de segundo más tarde de otro impacto (simbolizado por P_2). El segundo aplicador, colocado a cierta distancia, produce luego un tercer golpe final (llamado P_3). El intervalo de tiempo transcurrido entre P_2 y P_3 , así como la separación espacial entre ambos aplicadores, se alteran a voluntad. Las señales que aquí muestra el sujeto dibujadas en el antebrazo facilitan la colocación de los aplicadores para efectuar los registros sucesivos.



2. ERROR NORMAL ASOCIADO AL TACTO expresable de dos maneras: a través de la separación mínima media necesaria para que dos impactos se sientan como un par de contactos discretos cuando presionan simultáneamente la piel

(líneas negras), y a través de la separación media entre el punto de contacto percibido y el punto en el que realmente el percutor tocó la piel (líneas de color). La precisión del sentido del tacto varía mucho de una zona del cuerpo a otra.

Este aparente desplazamiento depende del intervalo de tiempo P_2-P_3 . Cuando se instruye al sujeto para que varíe lentamente la secuencia temporal P_2-P_3 desde el intervalo que permite la “veracidad” hasta sentir la coincidencia P_2/P_3 , aquél puede decir al experimentador cuándo P_2 parece haber recorrido ciertas fracciones simples de la distancia entre P_1 y P_3 . Por ejemplo, cuando el intervalo entre P_2 y P_3 se acorte de un cuarto a una décima de segundo, P_2 parecerá haberse desplazado la mitad del camino hacia P_3 . Si ese tiempo se reduce aún más, a una vigésima de segundo, P_2 se percibirá a tres cuartas partes del camino hacia P_3 ; a una quincuagésima de segundo, la localización de P_2 resulta ya indistinguible de la que ocupa P_3 .

Nos hallamos, pues, ante un fenómeno ligado estrechamente al tiempo. Cuando se promedian las ejecuciones de los sujetos, la curva resultante demuestra que el desplazamiento percibido del segundo golpe varía, de un modo casi lineal, con el tiempo transcurrido entre el segundo y el tercer golpe.

Imaginemos las sensaciones de golpeo como si fueran tres cuentas ensartadas en un cordón. Las dos de los extremos, las correspondientes a P_1 y P_3 , se encuentran en puntos fijos, sujetas

al cordón. La sensación suscitada por P_2 cae en otra zona del cordón, en un punto dictado por la distancia temporal entre P_2 y P_3 . Cuando ese valor es la quincuagésima de segundo o menos, el golpe coincide espacialmente con el que corresponde a P_3 ; cuando la secuencia temporal difiere en un cuarto de segundo o más, la sensación correspondiente a P_2 se une a la procedente de P_1 . Porque la sensación evocada por P_2 parece haber saltado de donde sería de esperar (en el locus de P_1/P_2) a donde es sentida de hecho (más cerca del locus P_3), en el breve lapso de tiempo comprendido entre P_2 y P_3 , este efecto ha recibido el nombre de salto.

En el experimento que acabamos de describir se especificaba que los dos aplicadores cutáneos situados sobre el antebrazo distaban entre sí unos 10 centímetros. ¿Sucedía lo mismo cuando ambos aplicadores se encuentran separados el doble, por ejemplo? La respuesta es no. Por lo que parece, el campo de operaciones del efecto de salto es limitado, y varía de tamaño y forma de una zona del cuerpo a otra.

Pueden establecerse fácilmente las dimensiones del campo en el que se observa el salto. El aplicador que envía el par inicial de golpes se mantiene estacionario mientras el aplicador de P_3 se

desplaza en pequeños pasos uniformes a lo largo del radio de un círculo centrado en el enclave de P_1/P_2 . En cada paso, el observador contrasta todos los intervalos de tiempo posibles P_2-P_3 para comprobar si P_2 es sentido o no en una localización desplazada. Cuando se llega a un punto de la piel donde deja de producirse salto alguno en todos los intervalos de tiempo, se pone fin a la serie y se mide la distancia entre el aplicador de P_1/P_2 y el aplicador de P_3 . A continuación, se desplaza un poco el aplicador de P_3 a lo largo del radio y se inicia una nueva serie de ensayos, esta vez a distancias cada vez menores del enclave de P_1/P_2 , hasta que reaparezca el salto. La media de las dos distancias medidas determina un punto en el límite del salto. Repitiendo este procedimiento a lo largo de varios radios, se van conectando los puntos hasta delimitar un campo dentro del cual siempre se produce el salto. Esta es el área de salto para esa muestra de piel concreta.

Exploraciones de ese tenor han facilitado mapas del área de salto correspondientes a diversas partes del cuerpo: las superficies interna y externa del antebrazo, el pecho, superficies ventral y dorsal del muslo, la palma de la mano y el dedo índice. Se ha intentado explorar otras áreas cu-

táneas extensas, pero existen ciertos inconvenientes. No es sólo cuestión de implantar aplicadores y tomar lecturas. La presión estática de los aplicadores debe mantenerse rígidamente constante, y los movimientos del cuerpo asociados a la respiración y circulación a menudo producen grandes variaciones en las fuerzas de contacto. También deben tomarse medidas especiales de acuerdo con las configuraciones y texturas cutáneas de las distintas áreas del cuerpo.

No obstante, podemos avanzar ciertas generalizaciones a partir de los datos ya obtenidos. Así, las configuraciones asumidas por algunas áreas de salto resultan intrigantes. En conjunto, las de las extremidades son ovales, con un largo eje paralelo al de la extremidad. En las superficies interna y externa del antebrazo y en la ventral y dorsal del muslo, el eje longitudinal viene a doblar el eje transversal. La palma de la mano y el dedo índice poseen áreas de salto más redondeadas. El pecho no sigue regla alguna: el área de salto queda truncada en la línea media del cuerpo. Lo mismo sucede en la frente, en el centro de la espalda y cerca del centro del abdomen. En todo caso se cumple un importante principio básico: el salto nunca cruza la línea media del cuerpo. Ello nos conduce a los procesos nerviosos subyacentes al salto, porque resulta evidente que este fenómeno respeta la dicotomía fundamental derecha-izquierda del sistema nervioso central.

Hasta aquí nos hemos ocupado del caso más simple de salto: dos golpecitos aplicados sobre la piel no demasiado lejos uno de otro, precedidos de un golpecito de aviso y referencia. ¿Qué sucede cuando P_2 consta de múltiples estímulos, cuando constituye una serie de golpes? Siempre que la serie no tarde demasiado tiempo en producirse y siempre que el tren completo de golpes se produzca en el punto de P_1 , se observarán dos respuestas. En el experimento inicial, el lugar donde era sentido el P_2 de un solo golpe podía ser cualquier punto a lo largo de una línea trazada desde el punto donde se había sentido P_1 hasta el punto donde se había sentido P_3 ; ello dependía de la secuencia temporal P_2 - P_3 . Por tanto, resulta comprensible que los golpecitos múltiples de P_2 se acusen como si se hubieran producido en algún punto entre P_1 y P_3 : de hecho, en el experimento revisado se administra al unísono todo un espectro de intervalos P_2 - P_3 . Más inquietante resulta, sin embargo, la observación de que el área de salto en el

caso de P_2 de golpes múltiples siempre es mayor que el área que corresponde a los P_2 de un solo golpe en la misma superficie cutánea.

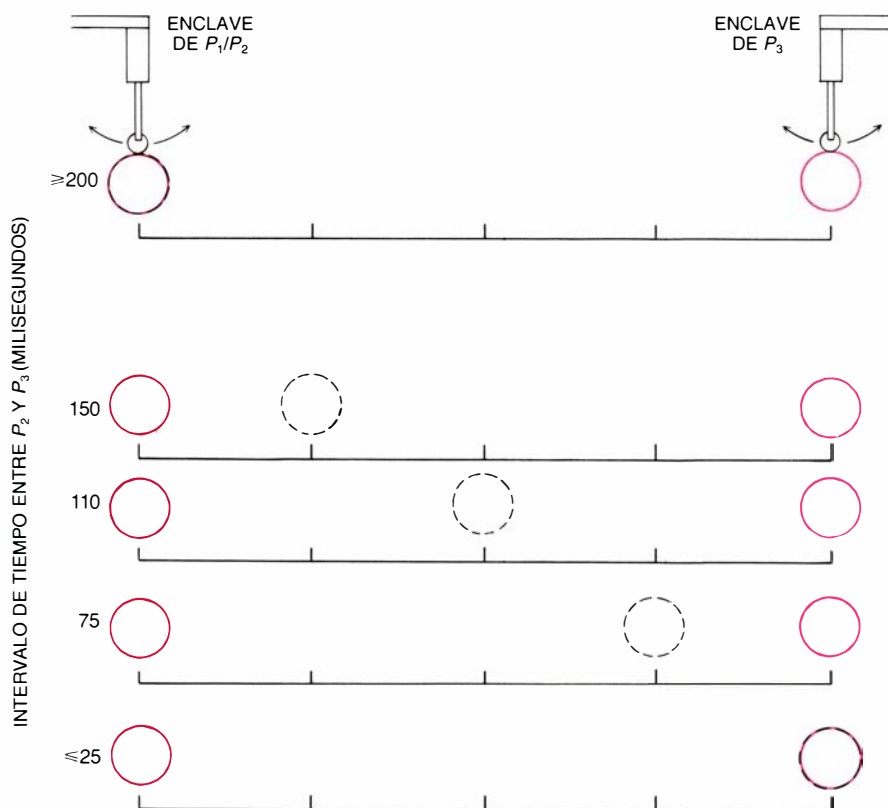
Se llevaron a cabo series de ensayos (con los mismos voluntarios que actuaron como sujetos cuando elaboramos el mapa de áreas de salto para P_2 de un solo golpe) en los que se subió el número de impactos de P_2 de dos a 12, manteniendo una distancia constante entre los mismos de 25 milisegundos. El aplicador cutáneo de P_3 se fue alejando progresivamente del otro aplicador en sucesivos ensayos, y se modificó al azar el número de golpes de P_2 en cada serie. Los resultados destacan el interés del número de golpes que constituyan el tren de P_2 : cuantos más golpes, más lejos puede situarse el aplicador de P_3 sin que deje de producirse el efecto de salto.

Esta característica del salto, junto con las ya mencionadas, abre interrogantes en el dominio de la neuropsicología, cuyas respuestas tan sólo pueden ser conjeturas. Para algunas preguntas sencillas sí hay solución. Por ejemplo, señalábamos antes que la incapacidad del golpe de P_2 para cruzar la línea media del cuerpo se hallaba en

concordancia con la simetría del sistema nervioso central. ¿Podemos demostrar que este fenómeno se asienta en el sistema nervioso central y no se origina en la piel?

Para investigar esta cuestión anestesiábamos con procaina las capas superiores de una franja oblonga de piel del antebrazo, de suerte que el sujeto no pudiera sentir golpecitos ni siquiera pinchazos en el área afectada. A un extremo de la franja oblonga, inmediatamente después del área insensible, aplicamos P_1 y un tren de seis golpes de P_2 ; al otro extremo de la franja insensible aplicamos un solo golpe de P_3 una vez finalizado el tren de P_2 . Si fuera algún mecanismo cutáneo el responsable del efecto de salto, los impactos sólo se sentirían en los lugares donde se aplicaran los estímulos. Pero si el salto tuviera su origen en el sistema nervioso central, no habría razón para que los golpecitos no se sintieran en sus localizaciones "normales": entre P_1 y P_3 sobre la piel anestesiada.

Cuando se llevó a cabo el experimento, la respuesta no tardó en aparecer. En todas las separaciones temporales apropiadas, los golpes de P_2 palpables se saltaron entera la zona



3. LOCALIZACION PERCIBIDA DEL IMPACTO CORRESPONDIENTE A P_2 (círculos discontinuos) en relación con la localización de P_1 y P_3 (círculos en color); viene a ser, con bastante aproximación, una función lineal del intervalo temporal entre P_2 y P_3 dentro del margen comprendido entre un cuarto de segundo y una quincuagésima parte del mismo. Esto determina el fenómeno del salto: a pesar de que P_2 se aplique por el mismo percutor cutáneo que aplica P_1 , la sensación evocada por P_2 puede quedar alejada del radio normal de error táctil de P_1 . Con una adecuada secuencia temporal P_2 - P_3 , el estímulo parece "saltar" abruptamente del enclave del aplicador P_1/P_2 a una posición próxima al enclave de P_3 antes de que el sujeto lo perciba.

adormecida. Resulta obvio que el salto se genera centralmente, es de presumir que en el cerebro, y no en los puntos de estimulación.

Comprobado que el salto se produce en un plano cerebral, cabe inferir posibles analogías en los demás sentidos. Para contar toda la verdad, se ha establecido ya un fenómeno similar en el sistema visual. Si dos focos de luz, separados entre sí por cinco grados de distancia angular vertical, centellean simultáneamente o en rápida sucesión y son vistos por alguien fijo en un punto situado entre los 15 y los 40 grados con respecto a la línea de las luces, el sujeto percibirá frecuentemente una luz “fantasma” entre ambos focos. Aun cuando los dos puntos luminosos reales incidan sobre el punto ciego del ojo, la luz fantasma seguirá viéndose entre ellos. También se ha observado que si un punto es rojo y el otro

verde, la luz fantasma adquiere un tono amarillo.

Podemos también poner de manifiesto el salto en el espacio auditivo. Suenan tres clicks (que corresponden a P_1 , P_2 y P_3 del caso táctil) por dos altavoces instalados en puntos diferentes, ambos en el mismo lado de la cabeza y a un metro aproximado de distancia de ella. Cuando un altavoz presenta el click P_1 , de aviso, y el click P_2 , seguidos 40 milisegundos más tarde del click P_3 presentado por el otro altavoz, P_2 suena como si tuviera su origen entre las auténticas localizaciones de ambos altavoces. Igual que en el caso de la piel, la variación del tiempo entre P_2 y P_3 desplaza el click fantasma hacia atrás y hacia delante entre ambos altavoces. Un fenómeno similar fue descrito por el físico y fisiólogo de origen húngaro Georg von Békésy, quien le atribuía los errores en la percepción de la localización de los instrumentos orquestales en salas de conciertos propensas al eco. Cuando un sonido llega al oído por un camino directo y un eco del mismo sonido le llega por un camino menos directo algunos milisegundos más tarde, resulta fácil establecer las condiciones para el salto auditivo; de ahí el aparente error de localización.

Ayudados en todos los hechos descubiertos a través de la experimentación, podemos especular en torno a la neurofisiología subyacente al salto. Lo distinguiremos de “fi”, otro fenómeno sensorial. “Fi” es una conocida ilusión que comenzó observándose en estudios de percepción visual. Puede inducirse provocando, en rápida sucesión, dos estímulos espacialmente separados (destellos luminosos en el caso de la visión, golpecitos cutáneos en el caso del tacto). Cuando esto se realiza adecuadamente, el sujeto percibe el estímulo avanzando uniformemente a través del campo visual o a lo largo de la superficie de la piel.

Dado que la ilusión fi se produce típicamente con una separación temporal de 100 milisegundos o menos (dentro del amplio margen en el que se presenta el salto), podría cometerse el error de suponer que un fenómeno constituye una variación del otro. El observador minucioso advertirá, sin embargo, la existencia de una notable diferencia cualitativa entre ambos fenómenos en su manifestación: lo mismo en el tacto que en la visión, la esencia de fi es la percepción de un movimiento continuo, en tanto que la experiencia del salto estriba en la percepción de uno o más contactos en suce-

sivas localizaciones discretas sobre la piel. En este caso el movimiento únicamente puede ser inferido, no sentido.

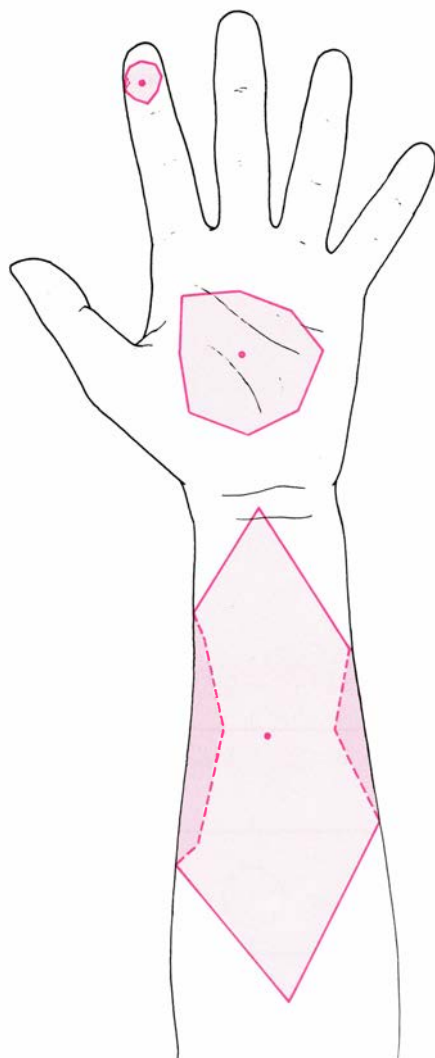
Mayor interés reviste el espacio sobre el que operan ambos fenómenos táctiles. Cuando se aplican dos golpes, adecuadamente distanciados en el tiempo, a puntos opuestos de la frente, se experimenta frecuentemente el efecto fi; sin embargo, nunca llega a sentirse el impacto fantasma de salto, pues el salto nunca atraviesa la línea media del cuerpo. Parece claro que el mecanismo nervioso responsable de fi no es el que origina el salto.

A pesar de los muchos hallazgos reveladores de investigaciones recientes sobre el sistema nervioso central, no puede asegurarse mucho más que lo dicho en lo que se refiere al mecanismo nervioso subyacente a las diversas manifestaciones del salto. Por ahora, tan sólo pueden ofrecerse hipótesis.

Estudios de la región somato-sensorial, la parte de la corteza cerebral que responde a estímulos táctiles, realizados en monos, han puesto de manifiesto la presencia de campos receptores: áreas de piel que, al presionarlas, producen una descarga de neuronas corticales. Al examinar la variación de tamaño de esos campos receptores con localización en el cuerpo, resulta asombrosa su correspondencia con los tamaños relativos de las áreas de salto. Estos campos son grandes en el tronco y extremidades superiores, aunque pequeños en las manos y dedos. Más aún, cuando se estudiaron anteriormente estos campos receptores en el tórax del gato, la frontera que delimitaba la línea media del cuerpo se convirtió en un rasgo característico notable. En el fenómeno del salto se refleja también el detalle refinado de la disposición espacial del sistema nervioso central, además de la gran dicotomía mitad izquierda-mitad derecha.

Como ya señalamos antes, cuando se introducen varios golpes de P_2 entre P_1 y P_3 , el área de salto parece agrandarse. Esto puede obedecer al efecto acumulativo de los golpes repetidos, que hace que la actividad excitadora se expanda en campos receptores circundantes, ampliando en consecuencia la región cortical activa en el proceso de salto.

Queda por someter la organización temporal de la corteza a un estudio comparable al que ha servido para trazar el mapa de su disposición espacial. Ahora bien, el examen del “enmascaramiento retrospectivo” de pa-



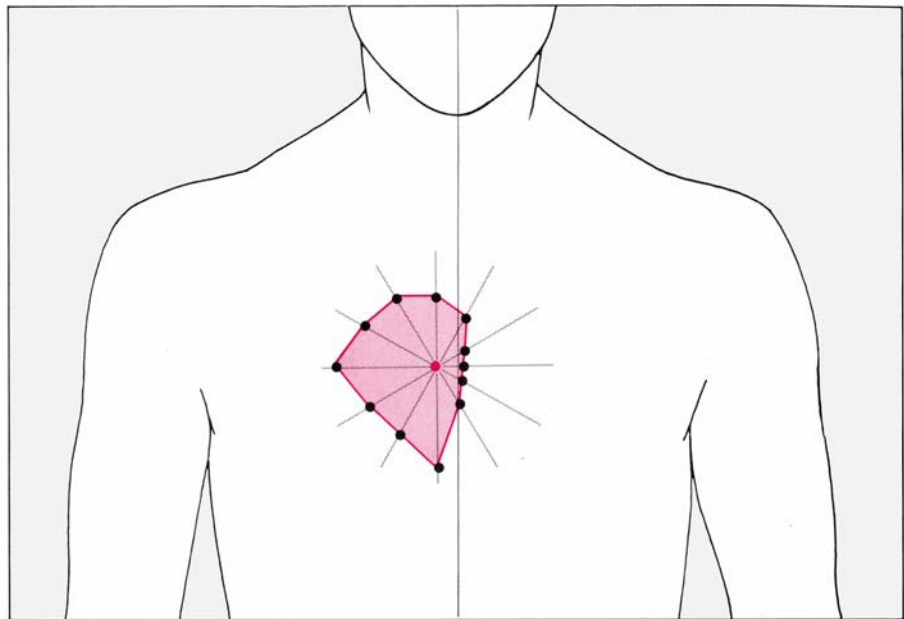
4. AREA DE SALTO (zona coloreada) de la superficie interna del antebrazo, palma y yema del índice. En estas regiones cutáneas puede desplazarse el aplicador de P_3 desde el enclave fijo de P_1/P_2 (línea discontinua de color) sin dejar de provocar el efecto de salto. La línea fronteriza discontinua indica dónde las áreas de salto delimitan el brazo y el índice.

trones propios de la vista, el oído y el tacto nos habla de su estrecha relación con el salto. Se observa enmascaramiento retrospectivo cuando dos patrones, así sonidos hablados o letras, aparecen en rápida sucesión. El patrón encubridor ejerce un efecto sorprendente sobre el primero: no se limita a dominar o superar al primer patrón, sino que tiende a incorporarlo. El hecho de que el impacto fantasma producido por P_2 parezca ser atraído hacia P_3 podría interpretarse como resultado de una modificación similar de una señal nerviosa inicial a cargo de otra subsecuente. Como los patrones de actividad nerviosa generados por posteriores impactos usurpan el terreno a los generados por golpes anteriores (siempre que tales golpecitos estén confinados en un pequeño lapso de tiempo y en una única zona de salto), es el último patrón el que tiende a prevalecer en la conciencia: va seguido de un relativo silencio, o al menos de la ausencia total de estímulo de modificación alguno.

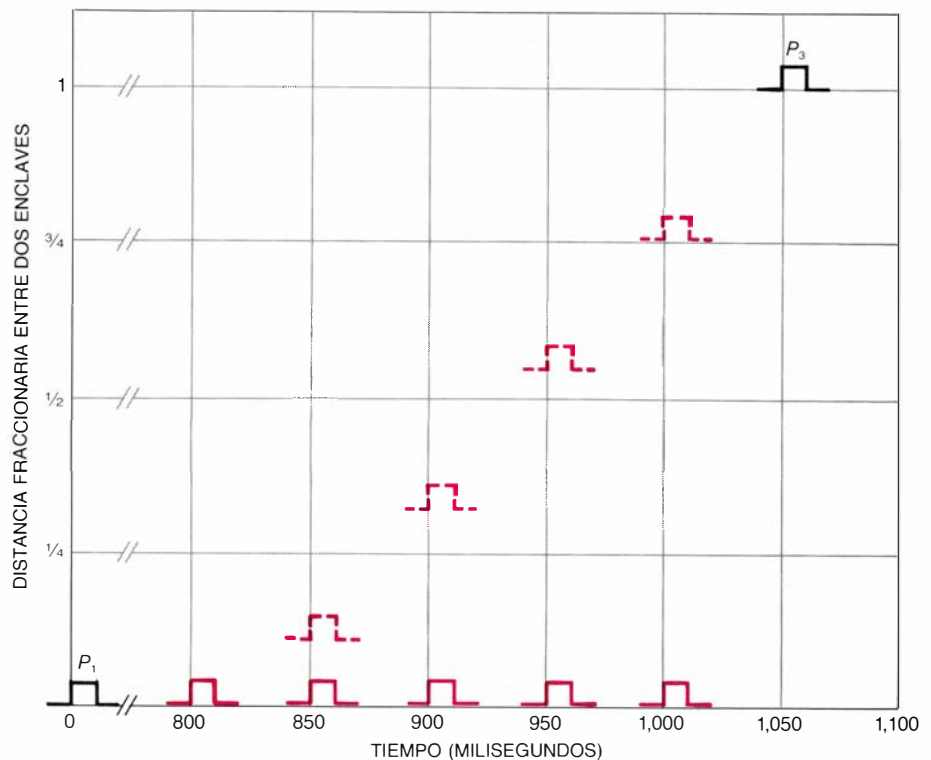
De hecho, una inspección rigurosa demuestra que el impacto de P_2 sufre otras modificaciones, además de la relativa a su posición aparente bajo la influencia de P_3 : pierde “nitidez” y quizá parte de su tamaño e intensidad. Cuanto más se acerca a P_3 en el tiempo, mayor peso alcanzan esas modificaciones. Sin embargo, en el planteamiento neurológico del asunto, la propiedad suprema es la localización. En la experiencia del observador destaca la pérdida de identidad espacial a medida que el entramado temporal se comprime y el presente engulle al pasado.

La actividad neuroeléctrica de la corteza refleja la excitación de muchas neuronas, ya que existe un gran solapamiento de campos receptores. En la medida en que los dos impactos permanezcan uno dentro del campo receptor que se solapa con el otro, y así disparen las mismas neuronas corticales, su conjunción temporal producirá los efectos inhibidores retrospectivos. Cuando los impactos aparecen registrados en campos separados, la confusión producida por su aparición conjunta espacio-temporal en el cerebro queda reducida o eliminada. Esto sugiere que los límites definidos de un área de salto determinan el límite de los campos receptores compartidos.

Aunque estas conjeturas sean eso, especulaciones, nos orientan sobre los lugares y procesos cuya exploración puede resultar provechosa. Cumple ahora a quienes buscan respuestas bajo la piel determinar si estas hipótesis pueden defenderse.



5. EJE DE SIMETRÍA DEL CUERPO (línea negra); determina una frontera que el tacto “fantasma” de P_2 nunca se saltará. El área de salto del pecho (región coloreada), descrita cuando se coloca el enclave de P_1/P_2 (punto de color) a un centímetro del centro, muestra una drástica interrupción al llegar a la línea media. Así pone de manifiesto el salto su conexión con el sistema nervioso, que protege la dicotomía entre la mitad derecha y la izquierda del cuerpo. Las líneas grises que arrancan del enclave de P_1/P_2 son radios a lo largo de los que se desplazó el aplicador de P_3 para determinar los puntos limítrofes del área de salto (puntos negros).



6. GOLPES MÚLTIPLES DE P_2 (en color): aparecen regularmente espaciados en el tiempo (comenzando, como en el caso del P_2 de golpe único, 800 milisegundos después de P_1). Se encuentran regularmente distribuidos en sus localizaciones percibidas (líneas discontinuas de color) entre el enclave de P_1/P_2 y el enclave de P_3 . El punto en que es sentido cada impacto componente de P_2 refleja la relación temporal del golpe con P_3 : más extensa que el área que corresponde a ensayos con P_2 de un solo impacto en la misma superficie cutánea. múltiple revelan un fenómeno más asombroso: el área de salto en ensayos con golpes múltiples siempre es más extensa que el área que corresponde a ensayos con P_2 de un solo impacto en la misma superficie cutánea. Más aún, cuanto más golpes constituyen el tren de P_2 , mayor es la expansión observada del área de salto.

Simulación del vuelo

Aumenta el empleo de simuladores en el entrenamiento de los pilotos para el desempeño de misiones complejas. Generar la escena visual constituye un reto a la tecnología de ordenadores

Ralph Norman Haber

La mayoría de los pilotos aprenden hoy a volar como se viene haciendo desde hace 75 años: con las manos en los controles de un avión, en un vuelo real. En un principio quizá les acompañe un instructor, pero tan pronto sepan aterrizar sin peligro, la mayor parte del resto del entrenamiento la harán solos. Así, a medida que han ido en aumento las prestaciones del avión y las múltiples exigencias de atención por parte del piloto, el aprendizaje del vuelo ha presentado cada vez mayores problemas.

Mientras que un caza de la Segunda Guerra Mundial apenas superaba los 400 kilómetros por hora, velocidad que alcanzan hoy los coches en la carrera de Indianápolis, los cazas actuales vuelan de dos a cinco veces más rápidos. Es más, su maniobrabilidad a altas velocidades hace que los tiempos de respuesta deban ser increíblemente rápidos. Incluso a sólo 600 nudos, un avión recorre más de 300 metros por segundo. A esa velocidad, y a una altitud de 300 metros, el avión chocaría contra el suelo en 20 segundos si el suelo tuviera una pendiente ascendente del 5 por ciento, inclinación que, desde el aire, a menudo cuesta detectar. El tiempo de colisión decrece proporcionalmente con la altitud y se reduce a sólo dos segundos en vuelo a una altitud de 30 metros. Pueden bastar dos segundos para evitar el desastre, salvo que el piloto atienda a la vez el aviso de un compañero de escuadrilla, o mire hacia atrás en busca de un posible atacante, o prepare el ataque contra un objetivo ya a la vista. Aun debiendo ocuparse de sólo unas pocas de esas tareas adicionales, puede que 20 segundos no sean tiempo suficiente para evitar el desastre.

¿Cómo pueden entrenarse los pilotos en esas complejas tareas sin perder la vida en el intento? La solución preferida, introducida durante la Segunda Guerra Mundial, es el simulador de

vuelo, donde el piloto puede practicar muchas tareas de vuelo sentado, a salvo, en tierra. Puede incluso ensayar la respuesta a situaciones imprevistas, especialmente las que provocarán los accidentes.

Pariente común del simulador de vuelo de aeronaves es el simulador de conducción de coches. En éste la carrocería se sustituye por una pantalla de proyección donde se presenta una escena de carretera. Una película preprogramada ofrece diversas opciones al conductor, que debe reaccionar ante ellas. La aproximación de otros coches, por ejemplo, una curva en la carretera o la aparición de señales de tráfico. La tarea del conductor consiste en controlar el coche manejando el volante, el acelerador y el freno. Ese tipo de simulación adolece de una importante limitación: el manejo de los controles por el conductor no produce el cambio correspondiente en el cuadro que presenta la pantalla. El giro del volante no permite al conductor ver o sentir el giro del coche. Casi todos los simuladores de automóvil son de este tipo de "bucle abierto".

Por el contrario, en un sistema de "bucle cerrado", el uso de los controles sí produce cambios de la escena. Para cerrar el bucle de un simulador, la escena representada debe tener existencia real, bien como modelo físico, bien como programa de ordenador. Cuando se utiliza un modelo físico, una cámara móvil fotografía el modelo desde la posición que ocuparía la aeronave, comportándose como si se tratara del propio aparato. De ese modo, el piloto ve la parte del modelo sobre la que vuela el avión; si el piloto acelera, lo hace la cámara y, si el avión gira, la cámara gira también. Cuando, en lugar de em-

plearse un modelo físico, la escena aérea la genera un programa de ordenador, éste usa una imagen de la porción de escena que queda justo frente al avión. La escena varía de acuerdo con los movimientos del avión. Ambos procesos dependen en gran medida del ordenador.

Los simuladores de vuelo se utilizan en la actualidad para entrenar los distintos tripulantes de aviones, helicópteros y naves espaciales. Me centraré en el entrenamiento de pilotos de cazas, pues es ahí donde la simulación plantea las mayores dificultades. El efecto conjunto de alta velocidad y baja altitud convierte en un desafío tecnológico el cambio realista de la escena visual y del movimiento aparente del simulador en respuesta a la actuación del piloto.

La base de un típico simulador de avión de ataque la forma una cabina real y su asiento, sin el resto del avión. La cabina está rodeada de una superficie de proyección sobre la que se presenta la escena visual. Para simular el movimiento del avión, la cabina se monta sobre una plataforma que puede moverse arriba y abajo y de lado, así como inclinarse. Al actuar el piloto sobre los controles de la aeronave, modifica el contenido de la escena y la sensación de movimiento de la aeronave. El simulador también puede reproducir la sensación de turbulencia atmosférica.

La cabina (rodeada por los aparatos que generan las imágenes y montada sobre la plataforma que produce el movimiento) suele encontrarse aislada en una habitación. Un cuarto de control aparte aloja el ordenador, que supervisa, controla y registra todos los aspectos de la simulación del vuelo. El simulador suele estar dirigido por un piloto instructor que se mantiene en co-

1. ATERORIZAJE SIMULADO del caza ligero AV-8B Harrier II sobre la pista de un portaviones, a cargo de un piloto del cuerpo de Marines de los Estados Unidos. El sistema de entrenamiento diseñado para esa aeronave, conocido por Entrenador de Vuelo Operativo, lo desarrolló la McDonnell Aircraft Company.

municación con el del simulador. El instructor puede asumir el papel de compañero de escuadrilla, control de tierra o control de misión y también puede manipular o intervenir en las diversas tareas que deba realizar el piloto. Puede, por ejemplo, mover objetivos, disparar misiles superficie-aire, hacer que aparezcan y ataquen otros aviones, cambiar el clima, provocar fallos del avión, rectificar las órdenes del piloto aprendiz y, en general, desencadenar un auténtico caos.

¿Cómo se crean esas simulaciones? El primer paso consiste en obtener un modelo del terreno sobre el que se efectuarán los vuelos. El contenido y detalle del modelo se determinan de acuerdo con la tarea que deba someterse a entrenamiento. Los primeros modelos eran de aeródromos o pistas de avión, puesto que en un comienzo los simuladores se emplearon fundamentalmente para practicar el despegue y el aterrizaje. Otros mode-

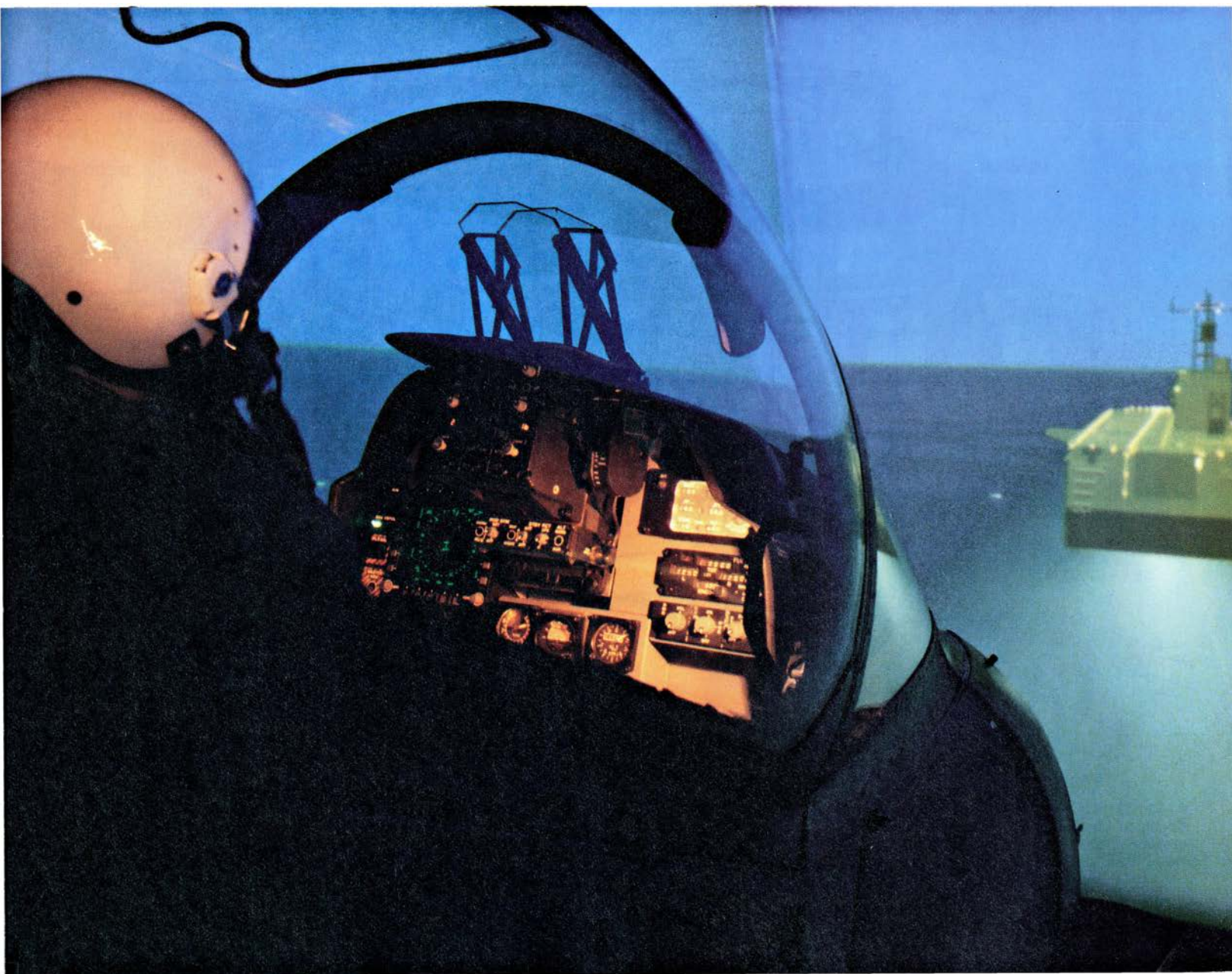
los son de aviones nodriza en un cielo vacío (para practicar el reabastecimiento aire-aire) o de uno o varios cazas (para simular el combate aéreo). Modelos recientes han incluido grandes extensiones de suelo sobre las que se pueden simular vuelos a baja altitud. En ese territorio habrá que observar y atacar objetivos, eludir misiles superficie-aire y, por supuesto, evitar accidentes naturales.

El modelo empieza como una descripción conceptual que habitualmente se plasma mediante un panel físico sobre el que "vuela" una cámara o con un programa de ordenador capaz de generar y presentar una imagen. En cualquier caso, la imagen de la escena se presenta al piloto en una pantalla de proyección o de vídeo.

Un modelo típico de panel suele medir 1 por 2 metros, en una escala que corresponde a unos 15 kilómetros cuadrados de terreno. Los controles de vuelo que maneja el piloto en la cabina del simulador se conectan a motores de

alta velocidad que mueven una cámara de vídeo sobre el panel, exactamente igual que lo hacía el avión al volar. El movimiento de la cámara mantiene la escala del modelo.

La principal ventaja del modelo de panel estriba en la minuciosidad de su presentación, probablemente inigualable por ningún sistema de generación de imágenes por ordenador. La eficacia del panel está limitada por la proximidad a la superficie a la que puede moverse la lente de la cámara. El piloto de un avión en pista se encuentra a unos tres metros del suelo, lo que corresponde a una distancia de menos de centímetro y medio en un modelo de pista construido a una escala de 300 a 1. Esa proximidad supera la distancia a la que puede colocarse una lente sin riesgo de dañarla. Es más, a esa distancia las lentes normales carecen de la suficiente profundidad de campo para simular las nítidas imágenes que vería el piloto. Se están desarrollando técnicas más modernas, que emplean aparatos de ba-



rrido por láser para resolver ambos problemas.

La construcción de modelos de panel resulta cara y de difícil modificación; están limitadas, además, por el tamaño de lo que pueden representar. Además, no son interactivos: los objetos no se mueven o desintegran en humo al atacarlos. Dada su escasa magnitud, los modelos de panel se memorizan rápidamente tras una práctica repetida. Por tanto, sólo son eficaces para la simulación de tareas de vuelo repetitivas cerca del suelo (especialmente el aterrizaje), para el vuelo sobre objetivos difíciles o para misiones en las que se requiere una descripción pormenorizada de la superficie, como es el caso de la práctica del vuelo en suspensión de helicópteros.

Las imágenes generadas por ordenador resultan mucho más versátiles, y cada vez son más los simuladores de cazas que utilizan escenas generadas por ordenador. Aquí el primer paso consiste en desarrollar un modelo conceptual similar al modelo de panel,

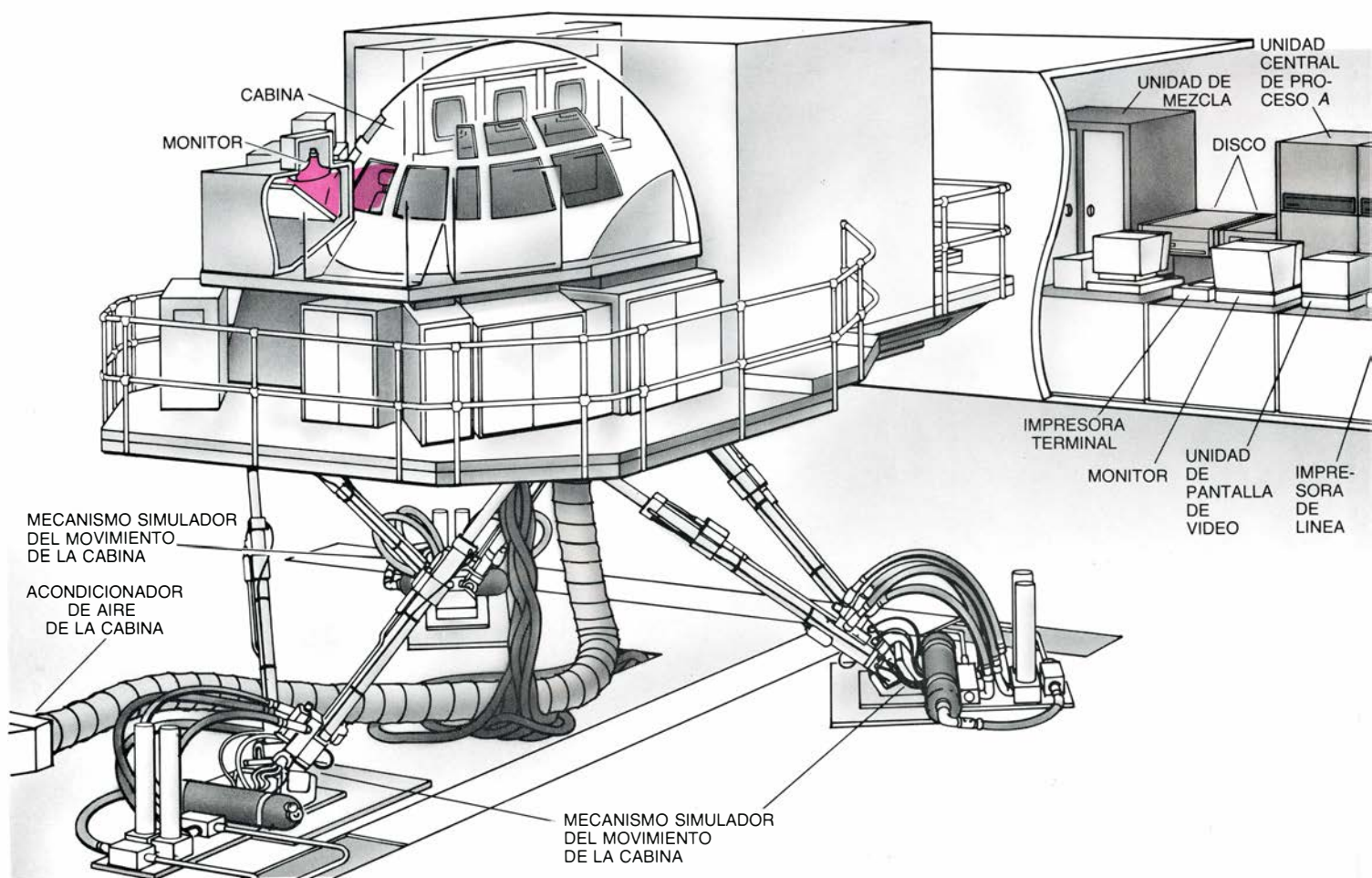
salvo en lo relativo al tamaño, que sólo está limitado por la cantidad de memoria y la velocidad del ordenador. El modelo define las dimensiones físicas del terreno, la textura y carácter de la superficie y cualesquiera objetos y artefactos que pueda haber sobre ella.

Programado ya el modelo y almacenado en la memoria del ordenador, se manipula de forma que se centre en ciertas porciones, las que corresponden a lo que ve el piloto desde la cabina en un instante dado. Lo cual requiere que el programa calcule la posición de cada parte del modelo respecto de la posición del avión. La mayor parte de la escena se deja invisible: cuanto queda detrás del avión, está demasiado lejos u oculta rasgos más prominentes en la línea de visión.

El programa calcula la proyección de los rasgos visibles del terreno que corresponde al ángulo de visión del piloto. El aviador que, sobrevuela un triángulo cuadrado y plano no ve una imagen cuadrada. Cuando se aproxima a cierta distancia, el campo, visto de frente, se le ofrece en escorzo: el extremo lejano

es más corto que el cercano y los lados convergen en un punto de fuga del horizonte. Cuando el avión se aproxima más al campo, los lados se alargan en relación con los bordes cercano y lejano, y la forma se hace menos trapezoidal, pues los lados quedan más paralelos. El campo sólo se proyectaría en un cuadrado si el avión se dirigiera directamente hacia él y se vieran los cuatro lados simultáneamente, y ello únicamente es posible cuando el avión va en picado hacia el centro del campo. Se conocen bien las transformaciones geométricas de una superficie en función del punto de vista, pero cada sistema de imágenes generadas por ordenador sigue un procedimiento de aplicación distinto.

Hasta hoy, la principal ventaja de los sistemas de generación de imágenes por ordenador ha sido su capacidad de crear y representar territorios de tamaño ilimitado. A diferencia de los modelos de panel, que sólo cubren unos pocos kilómetros de suelo, las imágenes generadas por ordenador pueden abarcar la bóveda celeste en-



2. UN SIMULADOR DE VUELO consta de una cabina (izquierda) y un cuarto de control (derecha). La cabina se encuentra encerrada en una superficie de proyección (ilustrada como una serie de monitores) donde se presenta la escena visual. Para simular el movimiento, la cabina se monta sobre una plataforma que puede subir y bajar, así como moverse de un lado a otro e inclinarse. Al

manejar el piloto los controles de la aeronave, se alteran tanto el contenido de la escena visual como la sensación de movimiento de la aeronave. El cuarto de control aloja el ordenador, que supervisa, dirige y registra todos los aspectos del vuelo simulado. El simulador suele encontrarse a cargo de un piloto instructor, que se mantiene en comunicación con el piloto que realiza las pruebas

tera, miles de kilómetros cuadrados de toda clase de terrenos, desde desiertos a montañas. En teoría puede escribirse un programa para cualquier nivel de detalle, pero en la práctica cuanto más precisa es la textura de la superficie (que aparezcan hojas en los árboles, ventanas en los edificios, carreteras o autopistas o rocas en las laderas de las montañas), más tiempo le lleva al ordenador generar cualquier muestra del modelo. Puesto que el programa tiene que generar el modelo en tiempo real, según vuela el avión sobre él, el nivel de detalle queda limitado por el tamaño y velocidad del ordenador y por su velocidad de "refresco" y de "actualización", sobre todo si el avión vuela próximo al suelo. Aun cuando, en principio, los sistemas de generación de imágenes por ordenador pueden crear escenas de detalle comparable al de los modelos de panel, en la actualidad ninguno lo logra en tiempo real, especialmente en el tiempo real exigido por el vuelo rápido a baja altitud.

Para presentar la escena visual, ya sea producida por un modelo de panel

o por imágenes generadas por ordenador, la mayoría de los simuladores utilizan el monitor de barrido, de tubo de rayos catódicos, parecido a un televisor convencional. En un sistema sencillo, adecuado para un avión con un estrecho campo de vista frontal, basta una sola pantalla de monitor, colocada frente a la línea de visión del piloto. Sin embargo, la mayoría de los cazas tienen un amplio campo de visión. Para crear una escena visual, se colocan en ese caso varias pantallas, de frente, por encima, a los lados e incluso por detrás de la cabeza del piloto.

El monitor de barrido de rayos catódicos produce las imágenes iluminando con gran rapidez una serie de puntos, los llamados píxeles, dispuestos en líneas de barrido. Nuestros aparatos de televisión tienen 625 líneas de barrido horizontales, independientemente del área que ocupe la pantalla del tubo. En cada línea de barrido hay 520 píxeles, cada uno de los cuales será iluminado por un cañón electrónico cuyo haz se mueve a lo largo de la línea. Para reducir el efecto de parpadeo de la iluminación secuencial de los puntos, se iluminan primero los píxeles de las filas impares, empezando por la mitad de la primera línea impar superior del tubo y descendiendo secuencialmente hasta el final de la última línea impar. A continuación se repite el proceso para las filas pares, desde el principio de la primera línea par superior hasta la mitad de la última. Veinticinco veces por segundo se iluminan todos los píxeles necesarios para acotar la escena que ocupa la pantalla, lo que define la cantidad conocida por frecuencia de "refresco" del monitor.

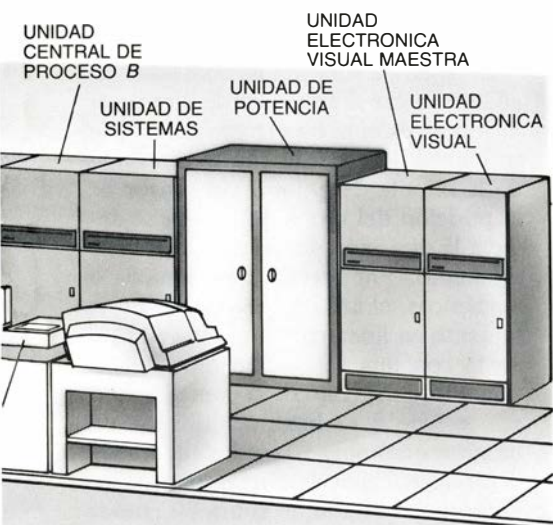
En los simuladores de vuelo, el número de líneas de barrido va de las 300 a las 1024, y el número de píxeles por línea de barrido de 512 a 1024. Ambos factores condicionan la resolución del tubo: la finura del detalle que puede mostrarse y que distingue al espectador. En un monitor de rayos catódicos, la resolución viene determinada por la distancia entre píxeles respecto de la de la visión. Si el número de líneas de barrido y el de píxeles por línea se mantienen constantes, la resolución de un monitor disminuye al aumentar el tamaño de la pantalla en relación a la distancia desde la que se mira. En otras palabras, cuando un monitor no tiene que cubrir más que un pequeño ángulo visual, su capacidad de resolución puede ser muy alta, y pueden presentarse y percibirse detalles finos. Sin embargo, si el monitor debe cubrir un amplio ángulo visual, la resolución se re-

duce. Para evitarlo, en el simulador se colocan a la vez varios monitores independientes. El simulador de vuelo del caza F-16 suele utilizar siete monitores de 36 pulgadas, que proporcionan un campo de visión de 300 grados en horizontal y 150 en vertical.

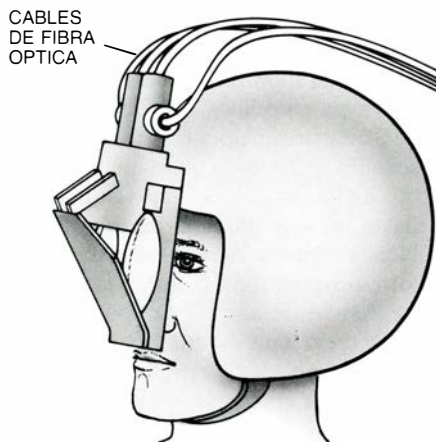
El brillo de la escena presentada en un monitor viene determinado por la intensidad del tubo de rayos catódicos y por la naturaleza de los elementos ópticos situados entre la superficie del monitor y el piloto. Cuando se contempla una escena real desde un caza, sus detalles se encuentran en el infinito óptico; de ahí que, en el simulador, entre el tubo y el piloto se coloquen lentes colimadoras que confieren paralelismo a los rayos de luz que parten del tubo, como si se reflejaran en objetos distantes. La escena generada en la superficie del monitor se presenta a través de una pantalla de difusión. La iluminación de una habitación normal es de alrededor de 50 candelas por metro cuadrado, mientras que la del tubo de rayos catódicos del sistema del F-16 es de unas 100 candelas (cuando se mira directamente al tubo). Sin embargo, las lentes colimadoras y las pantallas de difusión absorben tanta luz que la máxima que llega a los ojos del piloto es sólo de alrededor de una candela, más propia del crepúsculo que del mediodía. Puesto que el piloto se adapta fácilmente a ese nivel de luz, no le cuesta observar todos los detalles de la escena. Desgraciadamente, ese reducido nivel de iluminación limita el contraste lumínico, barrera que dificulta la representación de objetos próximos al umbral inferior de visión.

La mayoría de los sistemas de entrenamiento de vuelo hoy en uso se sirven de monitores para ofrecer la simulación visual, pero existen también otros dos sistemas de presentación. En uno de ellos la escena se proyecta sobre una pantalla cinematográfica panorámica situada frente al piloto. Supera ligeramente la resolución y brillo del monitor, pero, por lo demás, sus características son similares.

En el otro sistema de presentación, la superficie de proyección va incorporada en el casco del piloto. Este sistema es de desarrollo reciente, y aunque se dispone de varios diseños, se hallan todavía en fase de prueba. La imagen que se presenta procede de un par de tubos de rayos catódicos en miniatura, sujetos también al casco, o puede transmitirse, a través de un par de haces de fibra óptica, desde un proyector situado detrás del piloto. Cuando se perfeccione, la presentación en el casco



y puede asumir el papel de compañero de escuadrilla. La ilustración está basada en el simulador de entrenamiento de vuelo C-130H, que la compañía Singer está desarrollando a través de su división de simulación de vuelo, con base en la ciudad de Link.



3. SUPERFICIE DE PROYECCION, incorporada aquí al casco de piloto. La imagen que deba presentarse se transmite desde un proyector situado detrás del piloto a través de un par de cables de fibra óptica. El sistema es de reciente desarrollo, disponiéndose de varios prototipos en las primeras fases de prueba.

constituirá un simulador visual de gran interés económico, dadas sus exiguas proporciones. Tanto el ordenador como el equipo de proyección son similares a los utilizados en otros tipos de simuladores, pero aquí no se requieren pantallas exteriores ni baterías de enormes monitores: todo cabe en el casco del piloto.

El sistema de presentación en el casco ofrece importantes ventajas teóricas sobre otros sistemas, puesto que alcanza una resolución y un brillo mucho mayores. Más aún, ofrece una entrada visual distinta a cada ojo. Indican las investigaciones que en el cálculo de la profundidad resulta útil la disparidad binocular, y que la información acerca de la profundidad del movimiento relativo se procesa también binocularmente. Ningún simulador actual brinda al piloto esa información.

Los sistemas de presentación y generación de imágenes por ordenador no se sobrecargan excesivamente al utilizarlos en el ensayo de reabastecimiento en el aire, vuelo en formación o combate aéreo, ya que en esas tareas basta con presentar uno o dos aviones en un cielo completamente vacío. Sin embargo, sí surgen problemas de presentación de detalles en todos los aspectos relacionados con el vuelo a bajo nivel, incluidos la detección de objetivos, el ataque aire-tierra, ayuda visual y de radar en vuelo rasante y apoyo táctico y reconocimiento.

Los problemas de presentación de la escena en vuelo a baja altitud derivan de dos circunstancias: para que el piloto perciba correctamente la altitud y el espacio de maniobra se requiere un detalle mayor (lo que exige una resolución superior) y los detalles tienen

que variar más deprisa, considerando el rápido movimiento del punto de vista en cada instante (lo que exige aumentar la frecuencia de actualización). La necesidad de detalle aumenta porque el suelo no puede aparecer como una mera matriz uniforme de escaques de ajedrez. Los paneles vacíos informan poco de las ondulaciones del terreno. De no añadirse pormenores y objetos de la superficie, al piloto le costará mucho distinguir la altitud y juzgar si puede salvar las cumbres o evitar los obstáculos. Si la misión consiste en ceñirse al suelo todo lo posible para evitar la detección, la riqueza de la textura y los perfiles de la superficie resultan de importancia primordial.

Se han seguido tres soluciones a la hora de aportar suficiente detalle al vuelo a baja altitud. Puesto que la mayoría de los sistemas de ordenador generan los accidentes dibujando líneas rectas o aristas curvadas, se ha comenzado por exigir la presentación de más aristas en tiempo real. Poco a poco se está dando satisfacción a esa demanda. En los sistemas sin panel aparecen ahora 10 veces más aristas que cinco años atrás, y se espera duplicar esa cantidad en el próximo quinquenio.

La segunda solución ha consistido en añadir un canal adicional de alta resolución al sistema de presentación, que se mueve de acuerdo con la dirección de la mirada del piloto. Un sensor de la posición del ojo o de la cabeza detecta la dirección de la mirada en todo momento. Por medios electrónicos o mecánicos, el área del escenario directamente en línea con la mirada se presenta con una resolución mucho más fina que la del resto de la pantalla. Ello se consigue si, en lugar de utilizarse un monitor que cubra 90 grados cuadrados de área, el canal de alta resolución se alimenta con uno que cubra 30 grados cuadrados, lo que le dota de resolución triple. Se suprime el área de solapamiento de los canales de fondo de modo que sólo aparezca una imagen, y la presentación frontal gana entonces mucho en detalle.

La tercera solución exige decidir qué tipo de detalles resultan necesarios y ceñir la presentación a éstos. A largo plazo será la que alcance más eficacia, pero la investigación en ese campo es muy reciente y apenas ha aportado unas pocas respuestas. Según parece, en general, la importancia relativa de las diversas fuentes de información depende de la tarea perceptual que deba resolver el piloto. Por ejemplo, cuando el avión vuela bajo y rápido, las aristas que definen la textura de la superficie resultan menos importantes que las que

definen los cambios de la posición relativa. En otras palabras, quizás importe más la información sobre el movimiento relativo de los rasgos del suelo que la información sobre la propia textura de la superficie.

La necesidad de redibujar con gran rapidez todas las aristas de la escena durante los vuelos a baja altitud pone también en un brete a los sistemas de generación de imágenes por ordenador. La frecuencia europea de refresco de los monitores de barrido es de 50 ciclos por segundo; el tubo renueva completamente el contenido de la escena cada 20 milisegundos. Y ya que la escena cambia, el ordenador debe actualizar la pantalla para reflejar las nuevas posiciones de todos los objetos de la escena según las percibe el piloto. La necesidad de registrar los cambios rápidos, por ejemplo cuando el avión vuela bajo y deprisa, hace que las frecuencias de actualización de la escena entera resulten inadecuadas. Con ordenadores mayores y más veloces se paliará el problema, pero también se habrán de emplearse sistemas de presentación más ingeniosos.

En el vuelo real, el piloto contempla el movimiento del avión a través del territorio y advierte los cambios de la fuerza de gravedad asociados con los giros, los saltos, el picado y las turbulencias atmosféricas. Tales percepciones se apoyan en la información visual del movimiento, que proporcionan los ojos, y en los cambios de la fuerza de gravedad, que captan los órganos vestibulares del oído interno. Basta la visión para percibir la mayor parte del movimiento, por lo que no resulta imprescindible incluir la información gravitatoria en el simulador. Sin embargo, puesto que al piloto siempre le llega esa información en el vuelo real, muchos simuladores de vuelo incorporan una plataforma móvil cuyo movimiento estimula los órganos vestibulares.

Cuando el cuerpo se mueve a velocidad constante, sólo aportan información sobre el movimiento los cambios de las posiciones relativas y del tamaño de los objetos, según los detecte el sistema visual. Los órganos vestibulares únicamente captan la aceleración y deceleración, que son modificaciones de la velocidad del movimiento. Los cambios pueden ser de orientación transversal, como los que se perciben en un coche o un avión cuando aceleran o deceleran. Un coche de carreras puesto a punto llega a generar en una salida brusca una g (unidad de fuerza igual a la de la gravedad) adicional de fuerza transversal, lo que

equivale a duplicar momentáneamente el peso del conductor durante la salida. Un reactor 727 comercial crea alrededor de 1,5 g adicionales en el despegue.

Además de las fuerzas transversales, también se perciben cambios del movimiento vertical, como en el arranque y parada de un ascensor. Cada vez que un avión empieza a elevarse o a inclinarse para girar, las fuerzas gravitatorias empujan el cuerpo hacia el asiento (g positivas), mientras que el comienzo de un picado tiende a elevar el cuerpo (g negativas). En un caza, el giro proporciona el cambio más importante de la información del movimiento. Igual que el peso de un cubo de agua situado en el extremo de una cuerda aumenta al darle vueltas cada vez más rápidas, también el avión y su piloto se hacen más pesados cuando el avión efectúa giros más pronunciados y a mayor velocidad.

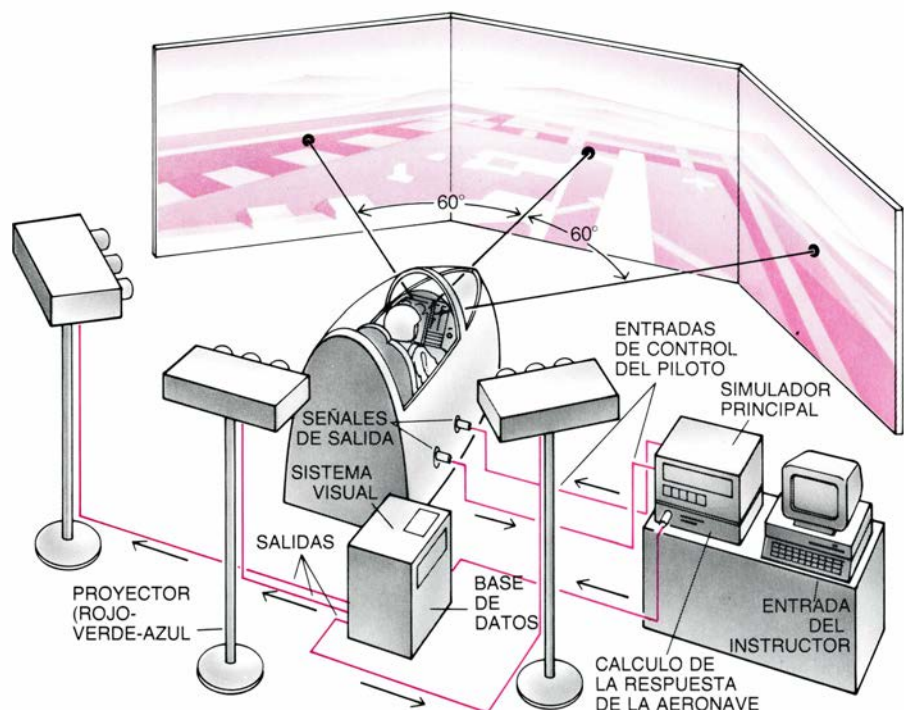
También se expresan esos cambios en términos de fuerza g . Una montaña rusa puede producir hasta +4 g de empuje durante su giro más violento; un caza F-16 puede ejercer más de +11 g de empuje sobre el piloto (y el avión) durante un giro violento. Lo que equivale a que el peso del piloto aumente de 90 kilogramos a 1000 kilogramos durante el giro, por ejemplo; un casco de menos de dos kilos pesa de repente más de 18. Aunque los giros de +11 g son muy poco frecuentes, son habituales los de +6 a +9 g .

Para producir las mismas sensaciones

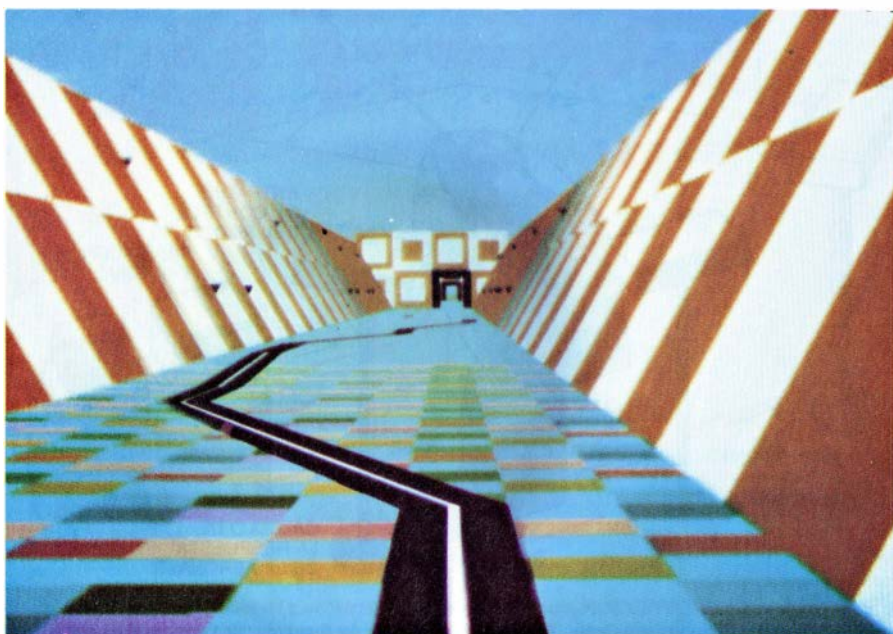
en el sistema vestibular del piloto, la cabina entera del simulador debe moverse imitando los cambios de velocidad y altitud de la aeronave. La NASA ha construido centrífugas para simular las fuerzas que experimenta el astronauta durante el despegue y el reingreso de un cohete, que pueden exceder las +10 g . En teoría podría instalarse en esas centrífugas una cabina de caza, pero ello resultaría desorbitadamente caro y probablemente innecesario.

En su lugar, la cabina se monta sobre una plataforma movida por un conjunto de pistones hidráulicos. El trayecto rara vez supera los 60 centímetros en cualquier dirección, y las fuerzas simuladas se limitan a 1,8 g , suficientes para proporcionar "indicios" de principio de cambio de movimiento. Mejor eso que nada, pero son escasas las pruebas en el sentido de que mejoren las actuaciones en los vuelos simulados. Sin embargo, en el entrenamiento para vuelo instrumental (necesario en caso de niebla o nubes), hasta la menor sensación de movimiento que proporcione la plataforma reviste interés.

Un método ingenioso y relativamente económico de simular fuerzas g positivas es el traje hinchable g , que cubre el abdomen y las piernas; cada vez que se experimentan fuerzas g positivas, actúa sobre porción inferior del cuerpo como el manguito de un esfigmomanómetro. Se aumenta así la pre-



4. PANTALLAS DE PROYECCION, que constituyen otra alternativa a los monitores como medio de presentación de escenas visuales simuladas. El cuarto de control de un simulador de vuelo no tiene por qué ser de grandes dimensiones; en algunos casos, como el dibujado aquí, basta un pequeño microordenador.



sión sanguínea y se retarda el flujo de sangre desde la parte superior del cuerpo, especialmente la cabeza. Incluso en un simulador sin plataforma de movimiento, cuando el avión deba someter a fuerzas g positivas al piloto, el traje g se hinchará y advertirá de un giro o ascenso.

Por supuesto, los simuladores de vuelo se justifican por el ahorro en combustible y mantenimiento de aeronaves. El vuelo de un caza F-16 en entrenamiento cuesta unos 5000 dólares por hora en combustible y mantenimiento, mientras que en el simulador del F-16 la hora sale por menos de la décima parte. Es más, los accidentes en simulador no generan gasto alguno, amén de evitar el riesgo de pérdida del piloto y el aparato.

Sin embargo, el mejor argumento en favor de los simuladores no guarda relación con el coste ni con la seguridad. Los simuladores brindan la oportunidad de asegurar un entrenamiento eficaz en situaciones que no pueden ensayarse en un avión en vuelo real. Por ejemplo, con los simuladores pueden ponerse a prueba las reacciones frente a sucesos altamente improbables y potencialmente desastrosos. Cuando en 1979 un DC-10 perdió un motor durante el despegue, su tripulación carecía de toda experiencia en los cambios repentinos de estabilidad y sustentación resultantes de la desigual pérdida de potencia y daño en el ala. Es imposible repetir ese contratiempo en un DC-10 real, pero resulta fácil simular los efectos de tales cambios aerodinámicos sobre el DC-10 y lograr que los pilotos aprendan a enfrentarse a esa emergencia. En el simulador se pueden experimentar gran variedad de emergencias, fallos y accidentes y perfeccionar las contramedidas.

También mejora con el vuelo en simulador el ritmo de aprendizaje. Se ha demostrado que ciertas tareas se dominan antes y se ejecutan con mayor destreza si los subcomponentes de la tarea se ejercitan por separado o en un orden distinto del natural. En este sentido, se ha demostrado que los pilotos aprenden a aterrizar mejor si practican

5. SE INCREMENTAN LOS DETALLES de la escena de un simulador añadiendo un canal de alta resolución al sistema de presentación. Un sensor ocular (o de posición de la cabeza) detecta la dirección de la mirada del piloto en cada momento. Se borra de los canales de fondo el área de la escena directamente en la línea de visión (*centro*) y se presenta esa misma toma con mayor finura por medio del canal de alta resolución. Sólo se proyecta una imagen, pero el detalle es máximo en la dirección frontal.

primero la aproximación final, sin tener que volar las primeras etapas de la aproximación.

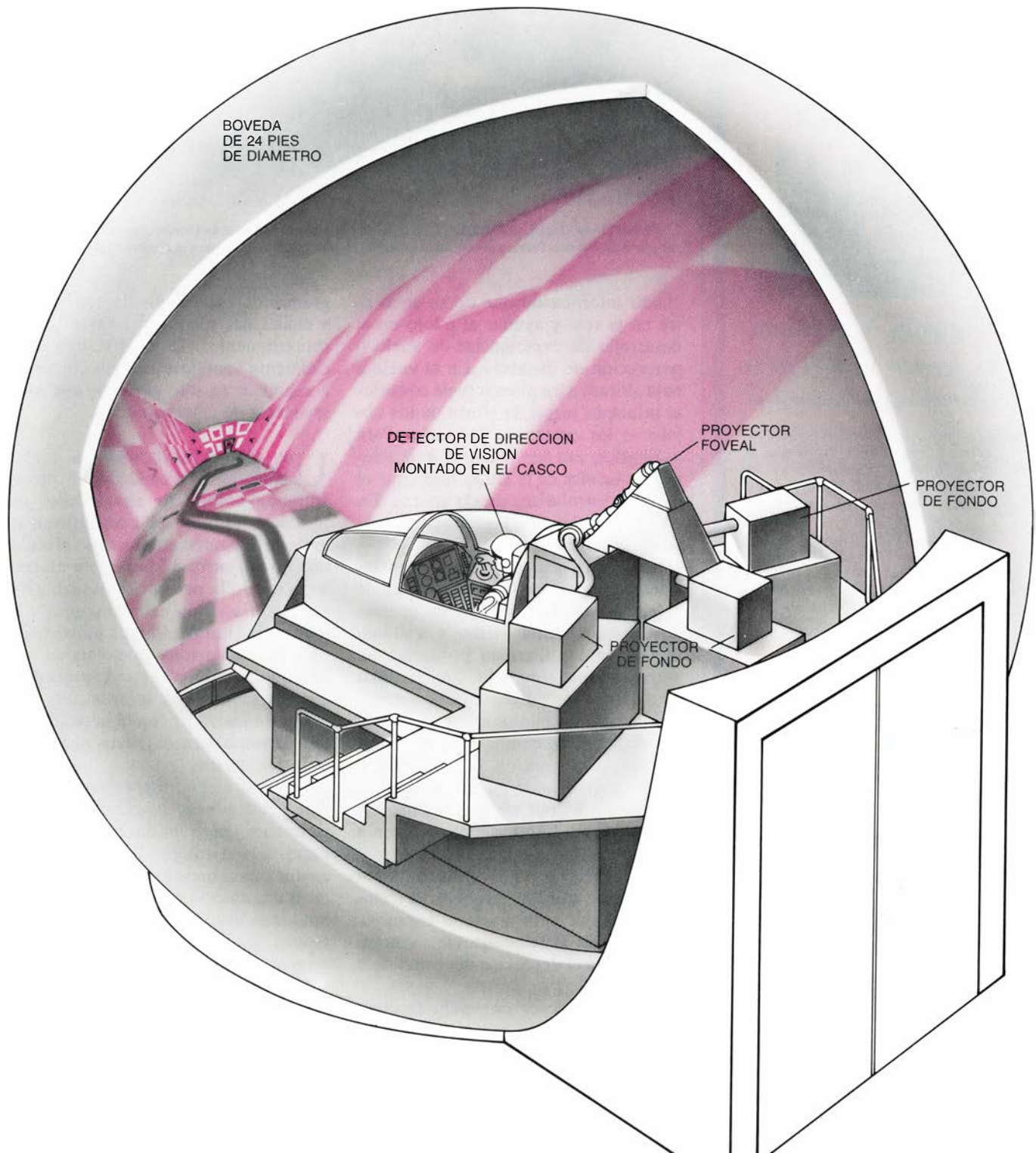
El entrenamiento simulado permite también incrementar el ritmo de ensayos. En el combate aéreo, en una hora de vuelo sólo se registran tres o cuatro encuentros, aunque éstos duren sólo un minuto cada uno. En el simulador cabe

plantear 20 o 30 encuentros en el mismo tiempo. Otro ejemplo: en la práctica del aterrizaje, el 95 por ciento del tiempo se dedica a dar vueltas en espera de turno. En el simulador se efectúan hasta 20 aterrizajes por hora de vuelo.

Algunos simuladores de entrenamiento de vuelo están dotados de un

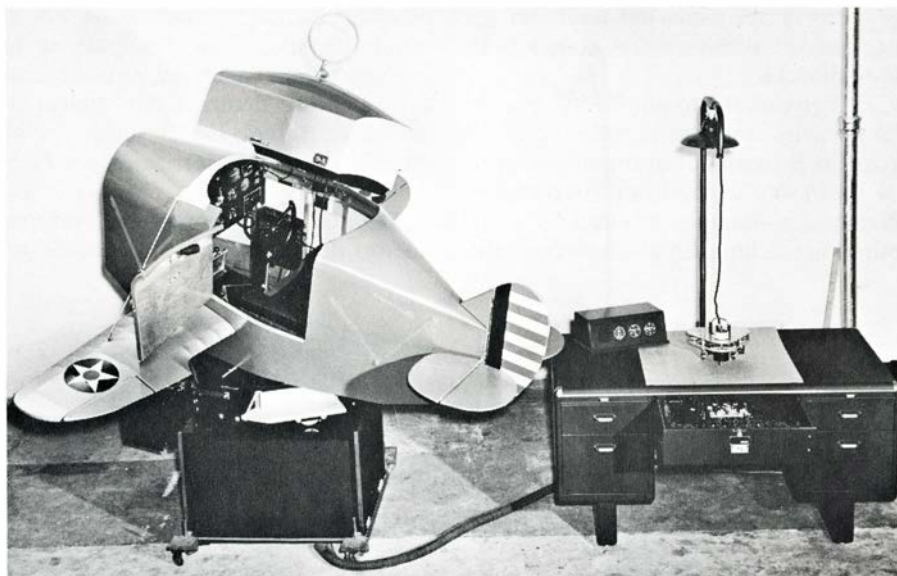
mecanismo de “congelación y repetición”. Si el instructor observa que el piloto comete un error, puede congelar la posición del avión y discutir y analizar el error antes de reanudar el vuelo. Al terminar éste, puede repetirse toda la secuencia; el ordenador manejará el avión como acaba de hacerlo el piloto.

La escena simulada también puede



6. SIMULADOR DE PROYECCION EN BOVEDA, que proporcionará una imagen continua de un campo visual de 270 grados horizontales por 138 verticales. Denominado ESPRIT (por eye-slave projected raster inset, inserción de pan-

talla en la dirección de la mirada), dotará al área visual que queda directamente en la línea de visión del aprendiz de más detalle que al resto del área visual [véase la figura 5]. Los proyectores de fondo presentarán las imágenes periféricas.



7. PRIMITIVO SIMULADOR DE VUELO, utilizado durante la Segunda Guerra Mundial. La demanda por parte de diversas fuerzas aéreas ha constituido el principal incentivo para el desarrollo de simuladores.

añadir información que no se encuentre en la real y ayudar al piloto en el desarrollo de experiencias de vuelo o percepción de distancia. En el vuelo a baja altitud, a los pilotos suele costarles al principio juzgar la altura de los objetos o los contornos del suelo. Para auxiliarles, pueden añadirse indicaciones artificiales de la altura hasta que el piloto desarrolla una escala interna. En ensayos posteriores, las señales van eliminándose gradualmente.

La experiencia acumulada por las principales fuerzas aéreas durante la Segunda Guerra Mundial y las guerras de Corea, Oriente Medio y Vietnam sugiere otra utilización potencial del entrenamiento simulado. Las pérdidas en combate se concentran casi exclusivamente en los pilotos con cinco o menos misiones de combate. Si se sobrevive a la quinta misión, la probabilidad de supervivencia de los que quedan es superior al 95 por ciento, sin que importe cuántas misiones más se lleven a cabo. Sugieren esos datos que si los pilotos recibieran un entrenamiento equivalente a cinco misiones de combate antes de enfrentarse al enemigo, las pérdidas se minimizarían, alterándose quizás el desenlace del combate o de la guerra.

Los simuladores de vuelo facilitan también la comparación de diferentes programas de entrenamiento, comparaciones que de otra forma resultan costosas, peligrosas y difíciles. Cabe examinar las ventajas y desventajas de cada programa en el curso del entrenamiento en simulador. Podría determinarse qué componentes de los pro-

gramas de entrenamiento son eficaces y cuáles no, y ensayar nuevas ideas y procedimientos. Lo cual resulta especialmente ventajoso cuando el proceso a examinar es sólo parte de una larga secuencia de entrenamiento.

Una última justificación de los simuladores trasciende el propio entrenamiento. Los simuladores del tipo descrito hasta aquí constituyen los mejores aparatos con los que efectuar una investigación básica sobre muchos aspectos de la percepción visual. ¿Resulta útil la visión estereoscópica a 30 metros de altura? ¿Cuánta información obtiene una persona en movimiento de la visión periférica? ¿Puede procesarse automáticamente la información periférica sin interferir con la necesidad de fijar la mirada en objetivos que se encuentran delante?

Los psicólogos experimentales se han planteado estas cuestiones anteriormente, pero hasta hoy la mayor parte de la investigación ha descansado en una pobre presentación de estímulos en el laboratorio o en la proyección de imágenes estáticas a observadores estáticos. La simulación del vuelo permite un control mucho mejor de la presentación de estímulos móviles, a la vez que contempla la posibilidad de que el movimiento se extienda por toda la escena. Resulta obvio que las respuestas a esas cuestiones facilitarán sobremanera la mejora del diseño de simuladores. Sin embargo, más importante es que mejore significativamente nuestra comprensión de cómo los seres humanos perciben su entorno.

La cutícula de los artrópodos

Esa compleja cubierta da razón de gran parte del éxito adaptativo de los artrópodos. A medida que se van conociendo su estructura y su naturaleza química, se entienden mejor las propiedades que le permiten brindar protección

Neil F. Hadley

El phylum de los Arthropoda supera a todos los demás grupos animales en número de especies y diversidad. Artrópodos son los crustáceos (cangrejos, langostas e isópodos), los insectos (avispa, abejas, hormigas y escarabajos), los arácnidos (arañas, escorpiones, garrapatas y arácnidos), las escolopéndras y varios grupos menores más; representan aproximadamente el 80 por ciento de todas las especies animales conocidas. Se han propagado de tal modo que ocupan todo tipo imaginable de nicho ecológico. Tras el triunfo de los primeros artrópodos en los hábitats acuáticos, algunos miembros del phylum se constituyeron en los pioneros del medio terrestre. Son los únicos invertebrados capaces de volar y de adaptarse en gran escala a la vida terrestre.

Factor decisivo de esa pujanza del phylum, cuyos miembros poseen un cuerpo segmentado, patas articuladas y recio esqueleto externo, es la cutícula. Esta les sirve de esqueleto, cubre la superficie del cuerpo y los apéndices y, en muchos insectos, forma las alas. Reviste además los tubos traqueales, diversos conductos glandulares y órganos sensoriales y las regiones anterior y posterior de tracto digestivo. La cutícula brinda sostén, una superficie donde anclar los músculos y establecer una barrera entre el animal y el medio ambiente. A decir verdad, una de las funciones cruciales de la cutícula, la limitación de la pérdida de agua, permitió a los artrópodos abordar con éxito la transición de una existencia acuática a otra terrestre. La cutícula puede ser rígida o blanda. Muchos crustáceos y escarabajos tienen la cutícula gruesa, rígida, como una armadura; pero las larvas de cuerpo blando de muchos artrópodos presentan un exoesqueleto delgado y más flexible.

Dada la importancia de la cutícula en la evolución y la persistente supervivencia de los artrópodos, desde hace

décadas vienen estudiando sus características investigadores del mundo entero. Se ha progresado extraordinariamente en los últimos 15 años, gracias, sobre todo, a los adelantos de la microtecnología, cuyas técnicas han dado respuesta, en diversa medida, a las cuestiones relativas a la estructura fina básica de la cutícula, composición química y disposición arquitectónica de las principales divisiones cuticulares e incidencia de esas características en la función cuticular.

Las primeras investigaciones, efectuadas con microscopio óptico, pusieron de manifiesto las dos principales divisiones estructurales: una capa externa, delgada, llamada epicutícula, y otra más gruesa, la procutícula. Esas láminas descansan sobre la epidermis: una monocapa de células que, en primera instancia, secretan la cutícula. En conjunto, la cutícula y la epidermis componen el tegumento, la cubierta externa de los artrópodos.

El estudio de la estructura fina de las dos divisiones cuticulares básicas hubo de aguardar al desarrollo del microscopio electrónico y métodos especiales de preparación de muestras para la observación. Entre quienes han aplicado esas herramientas, en particular el microscopio electrónico de transmisión, citaremos a Anthony C. Neville, de la Universidad de Bristol, Michael Locke, de la Universidad de Ontario Occidental, Barry K. Filshie, de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, de Australia, e Yves Bouligand, de la École Normale Supérieure de París.

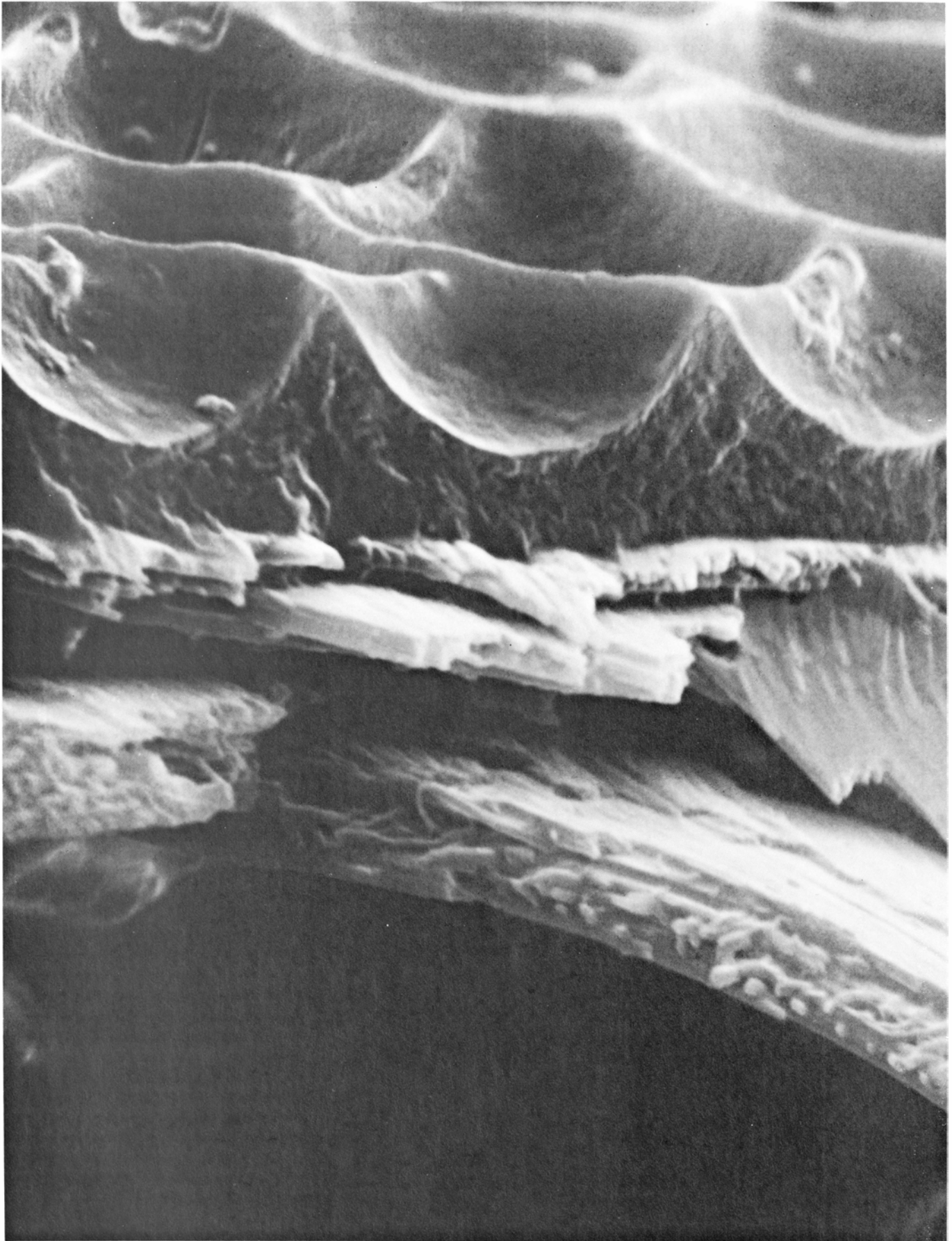
La epicutícula, importante por dotar a la mayoría de artrópodos de capacidad para retener agua, alberga cuando menos dos subcapas, y ello pese a medir tan sólo de 0,1 a 3 micrómetros de grosor. En algunas especies puede presentar hasta cinco subcapas, si bien la superior, de cuticulina, y la epicutícula

interna, que por sí sola compone más del 90 por ciento de toda la epicutícula, parecen ser las de presencia universal.

Resulta especialmente fascinante la superficie de la epicutícula. Observada con el microscopio electrónico de barrido, que ofrece imágenes tridimensionales, muestra un grado asombroso de micrograbadura. Es habitual la presencia de polígonos, a menudo hexágonos, con sus aristas algo elevadas. Una superficie así, relativamente lisa, da lustre al animal y suelen tenerla especies que ostentan coloraciones de advertencia. A menudo, estructuras microscópicas de formas diversas, así protuberancias, espinas o pliegues, desdibujan parcial o completamente los polígonos. Tales microestructuras amortiguan la reflexión de la luz en la superficie y pueden conferir al artrópodo un aspecto apagado; son muy corrientes en insectos que fían en el ocultamiento para protegerse de los depredadores.

La otra división cuticular importante, la procutícula, compone el grueso del tegumento; su espesor mide de 10 a varios centenares de micrómetros. La procutícula da razón de la forma y resistencia de la cutícula. Lo característico es que presente una exocutícula (capa pigmentada externa) relativamente delgada y una endocutícula más gruesa. En algunos casos se forman otras dos subcapas: la mesocutícula, entre la exo y la endocutícula, y la capa de deposición, entre la epidermis y la cutícula.

Diversos canales verticales atraviesan las distintas capas cuticulares. Los mayores, los conductos de las glándulas tegumentarias, se prolongan desde los sacos de la epidermis hasta la superficie, donde las aberturas suelen distribuirse en intervalos regulares. El material excretado por esos conductos no se conoce todavía bien. Los otros canales, complejos de porocanales y canales de la cera, son más estrechos y numerosos que los conductos glandu-



1. CUTÍCULA de recubrimiento del ala de una cicindela. Presenta la laminación característica de la cutícula de los artrópodos. La muestra se sometió a congelación y fracturación para obtener esta micrografía electrónica de barrido, que recoge una sección transversal del espécimen, ampliada unos 7200 diámetros. Las formas poligonales que se levantan de la superficie (*arriba*) co-

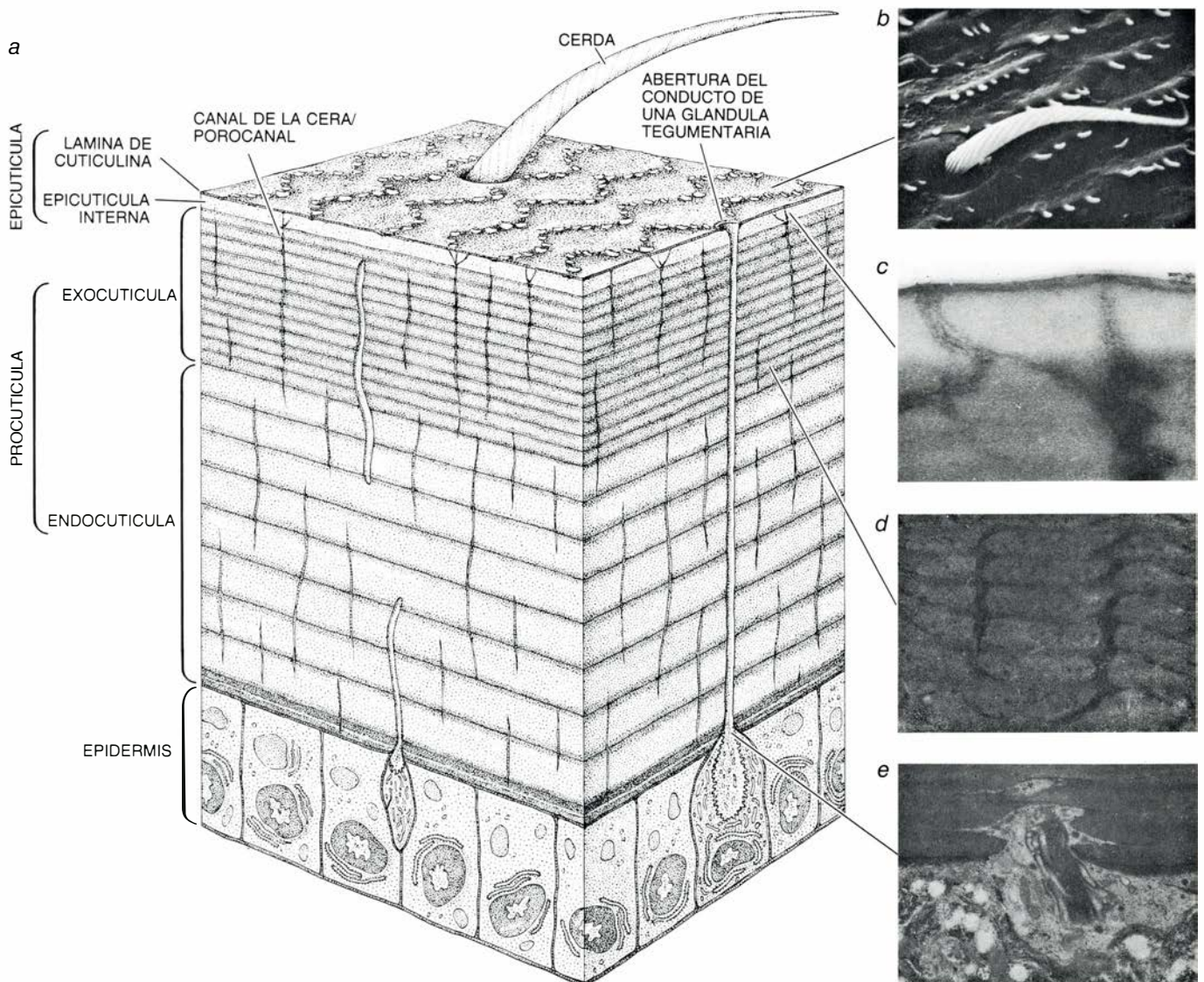
rresponden a la epicutícula y la exocutícula, que, a este aumento, forman como una zona oscura. Debajo aparece la endocutícula (*lámina blanca mellada*); su organización recuerda la de la madera multilaminar. El arco blanco, sito debajo de la cutícula del ala, es la pared superior, forrada de endocutícula, de un conducto traqueal grande; la zona negra corresponde a la luz del mismo.

lares tegumentarios. Los porocanales parten de la epidermis y se juntan con los canales de la cera en el contacto de la exocutícula y la epicutícula; estos últimos terminan en la superficie de la capa de cuticulina, o cerca de ella. Se cree que tales complejos constituyen la vía por donde viajan lípidos ("ceras") desde la epidermis hasta la epicutícula. Es probable que en los crustáceos los porocanales transporten asimismo calcio hasta la endocutícula, la exocutícula y la epicutícula; el calcio y otros materiales inorgánicos endurecen la cutícula.

Por supuesto, la estructura cuticular experimenta cambios durante la ecdisis, o muda, proceso característico de los artrópodos, decisivo si el animal ha de crecer. Antes de que se des-

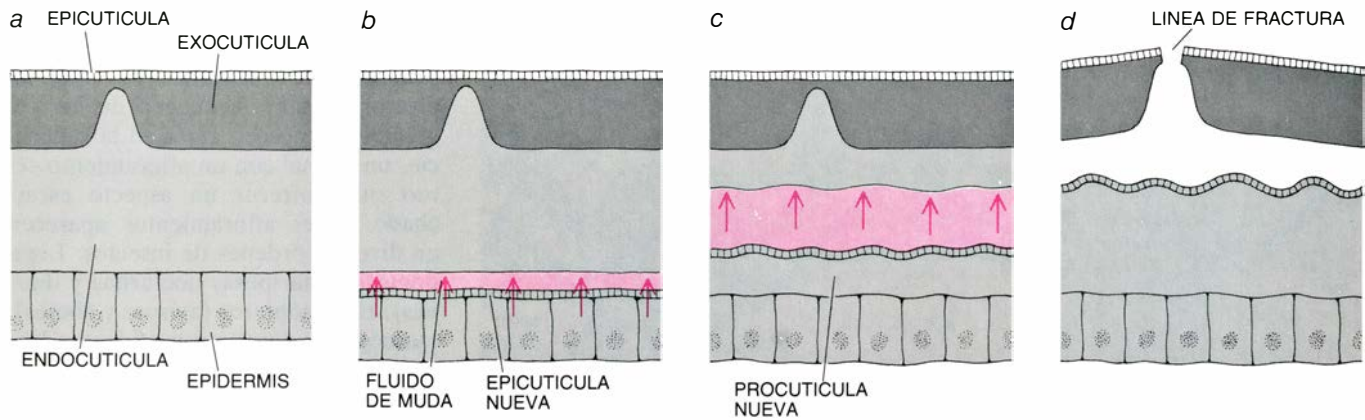
prenda la cutícula vieja, las células epidérmicas secretan una epicutícula nueva, blanda. (Probablemente sean las células epidérmicas las responsables de las formas poligonales que, en última instancia, se advierten en la superficie; las aristas de los polígonos parecen coincidir con las de las células.) Secretada la epicutícula por la epidermis, ciertas enzimas atraviesan la nueva capa de cuticulina y empiezan a digerir la endocutícula vieja. Cuando está parcialmente digerida, la epidermis secreta una procutícula blanda. Finalizada la digestión, el animal abandona el caparazón viejo y se hincha para estirar la cutícula. En menos de 24 horas, la exocutícula nueva se ha endurecido. Más adelante, algunos artrópodos añaden calcio, lípidos u otras sustancias a la nueva cutícula.

Diversos procesos químicos determinan en su mayor parte las diferencias funcionales que se advierten entre las dos principales divisiones cuticulares. La epicutícula es rica en lípidos, aunque esos compuestos químicos se presentan hasta cierto punto por toda la cutícula. Se tiene la impresión de que los lípidos constituyen la barrera primaria de los artrópodos contra la pérdida de agua a través de la cutícula, pero no parece que intervengan mucho en la forma y consistencia de esa capa protectora. La procutícula está compuesta esencialmente de quitina embutida en una matriz proteica. La quitina que, se cree, falta en la epicutícula, es un polisacárido (un complejo de azúcares unidos entre sí) similar a la resistente celulosa, componente estructural de los vegetales. En conjunto, la qui-



2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS de la cutícula de los artrópodos, patentes en la del grillo doméstico (a). Las divisiones principales, epicutícula o procutícula, se apoyan en un estrato simple de células epidérmicas (la epidermis). La procutícula suele hallarse dividida, a su vez, en una exocutícula y una endocutícula. La cutícula está atravesada verticalmente por los conductos de las glándulas dérmicas y los estrechísimos porocanales, que se juntan con los canales de

la cera en la proximidad de la superficie de la cutícula. A la derecha, las cuatro micrografías del laboratorio del autor muestran (de arriba abajo) una cerda y numerosas protuberancias (microtritos) de la superficie (b); canales de la cera uniéndose a un porocanal en el contacto de la epicutícula y la exocutícula (c); porocanales (zonas oscuras) serpenteados a través de la exocutícula (d) y el conducto de una glándula tegumentaria saliendo de la glándula en la epidermis (e).



3. FORMACION DE LA CUTÍCULA NUEVA, que sigue un proceso por etapas. Antes de que el artrópodo mude (a), o se desprenda de la cutícula vieja, comienza a desarrollarse otra nueva. Primero se separa la cutícula original de la epidermis, que secreta un fluido con enzimas de muda hacia el espacio recién creado, así como una epicutícula nueva (b). Después, el fluido digiere la endo-

cutícula vieja, mientras la epidermis va secretando una procutícula nueva, todavía indiferenciada (c). Cuando el fluido ha digerido por completo la endocutícula vieja, buena parte del mismo se reabsorbe, se rompe la cutícula original (d) y el animal emerge. Poco tiempo después, la exocutícula nueva se endurecerá y la epidermis añadirá material a determinadas porciones de la cutícula fresca.

tina y la proteína representan el 90 por ciento del contenido orgánico de la cutícula y brindan buena parte de su carácter estructural. Otros componentes cuticulares son: pigmentos, los ácidos conocidos como fenoles y diversos materiales inorgánicos.

Probablemente ninguna otra función cuticular posea tanta importancia como la retención de agua; de ahí que los investigadores hayan prestado especial atención a la naturaleza química de los lípidos cuticulares y a determinar cómo impiden esas sustancias —en particular las asociadas con la epicutícula— la deshidratación. Los lípidos se presentan en la epicutícula en forma de moléculas libres, moléculas combinadas con proteínas y gruesos depósitos superficiales. La extracción de lípidos del cuerpo entero, o de las cutículas mudadas, de los artrópodos terrestres rinde, por lo general, una mezcla compleja de especies moleculares. Los lípidos más abundantes suelen ser hidrocarburos, formados por largas cadenas de átomos de carbono combinados con hidrógeno. Tal predominio de los hidrocarburos es significativo porque, por lo común, interactúan poco con el agua. Los hidrocarburos hallados son: *n*-alcanos, o alcanos “normales”, moléculas de tipo parafínico compuestas de cadenas lineales saturadas (con sólo enlaces sencillos entre los átomos de carbono); *n*-alquenos, que son también cadenas lineales, pero insaturadas (con dobles enlaces entre los átomos de carbono); y compuestos ramificados, con uno o más grupos metilo (CH_3). Acompañan, a los hidrocarburos, derivados oxigenados de los *n*-alcanos, si bien en cantidades muy pequeñas, a veces trazas. Entre estos derivados pueden contarse ésteres céreos, ácidos grasos libres, alcoholes y cetonas. También puede haber lípidos cíclicos; los esteroides (sobre

todo el colesterol) son los más corrientes. De todos estos lípidos, los *n*-alcanos y los ésteres céreos son los más hidrófobos, o repelentes del agua. Las cadenas largas de cualquier lípido tienden a ser más hidrófobas que las más cortas.

Igual que ocurre con la naturaleza química de los lípidos cuticulares, cabría esperar que la distribución de los mismos influyera en las propiedades de barrera de la epicutícula. Por desgracia, la eficacia del microscopio electrónico de transmisión ha dejado que desear a la hora de revelar tal distribución. Varias razones lo explican. Una, que la extracción de las ceras con los métodos al uso no parece influir en el espesor o las formas de los compartimentos cuticulares de los que se extraen; por consiguiente, no se puede coleccionar la presencia de lípidos en los compartimentos de una sección transversal epicuticular a partir de los cambios estructurales que se derivan de la extracción lipídica. Además, aunque los investigadores pueden ver claramente que hay lípidos en la cutícula superior cuando examinan cutícula teñida bajo el microscopio óptico, no pueden confirmar su presencia —ni analizarlos en detalle— con el microscopio electrónico de transmisión, a no ser que se tomen precauciones especiales; la mayoría de las técnicas convencionales de preparación de muestras cuticulares disuelven los lípidos que se pretende poner de manifiesto.

No obstante, se ha progresado algo. En 1975, Sir Vincent Wigglesworth, de la Universidad de Cambridge, diseñó un procedimiento de observación de lípidos en secciones finas de cutícula mediante exposición del tejido a mirceeno —un hidrocarburo no saturado ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$)— entre aplicaciones de osmio

fijador. Se supone que el mirceeno se incorpora a los lípidos y que el osmio, que fija y tiñe el tejido a un tiempo, se une al mirceeno. Con esa técnica, Wigglesworth puso de manifiesto los lípidos de los canales epicuticulares de la chinche *Rhodnius prolixus*.

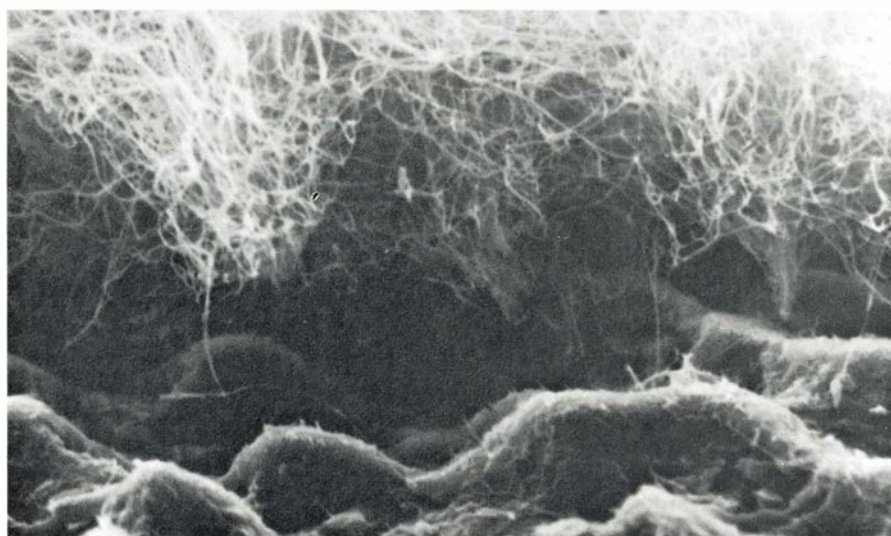
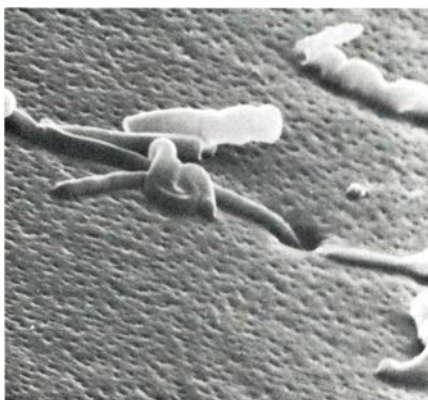
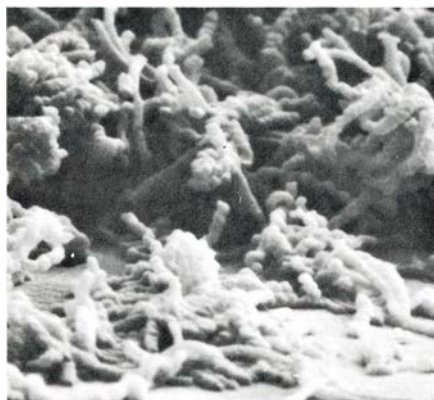
Pese a la dificultad que entraña la confirmación de la presencia de lípidos cuticulares con el auxilio de la microscopía electrónica de transmisión, varios investigadores hemos descubierto indicios de la importancia de estos lípidos, en particular de las moléculas de cadena larga, para la retención de agua por los artrópodos. Mis alumnos y yo hemos demostrado, por ejemplo, que los insectos y los arácnidos que muestran tasas bajas de pérdidas de agua, o que viven en ambientes que la favorecen, suelen presentar las mayores cantidades de lípidos cuticulares, y también de hidrocarburos u otros lípidos de molécula saturada, de cadena larga.

Mis propias investigaciones se ordenan a la búsqueda de correlaciones entre la eficacia aislante de la cutícula (como barrera para el agua) y la composición, forma y distribución de los lípidos cuticulares. Probablemente todas las capas cuticulares y los diversos tipos de compuestos químicos contribuyen a la capacidad de conservar el agua de que goza la cutícula de los artrópodos, pero mis investigaciones se han centrado en los lípidos del interior y la superficie de la epicutícula, porque parecen constituir la principal barrera contra la pérdida de agua en la mayoría de las especies.

Buena parte de los indicios de la existencia de lípidos epicuticulares, y de la importancia de algunas de sus clases para la impermeabilización, proceden de las investigaciones en especies que llevan gruesos depósitos de cera en la superficie, sobre todo las que pre-



4. EL COLEOPTERO DEL DESIERTO (*Onymacris rugatipennis*), a la izquierda, está cubierto por un afloramiento céreo. El ejemplar de la derecha, de la misma especie, no presenta afloramiento. Los afloramientos céreos son gruesos depósitos lipídicos (ceras) que pueden cubrir toda la superficie cuticular y conferir al animal un aspecto escarchado. Ayudan a impedir la pérdida de agua y también brindan camuflaje. *O. rugatipennis* es uno de los muchos escarabajos tenebriónidos del desierto de Namibia. La fotografía se publica aquí por cortesía de Elizabeth McClain, de la Universidad del Witwatersrand, de Johannesburgo.



5. DEPOSITOS DE CERA fotografiados en ejemplares del laboratorio del autor en la Universidad estatal de Arizona. Ilustran las diversas formas que pueden adoptar los componentes de los afloramientos céreos. Se dice que un depósito de cera grueso forma un afloramiento céreo cuando sobresale de la superficie cuticular y se orienta al azar. El afloramiento de un escarabajo longicorne (arriba, a la izquierda) está formado por secreciones retorcidas, tubulares. Se observa la secreción de un poro de la superficie (arriba, a la derecha), cuando se elimina la mayor parte del afloramiento mediante un ligero cepillado. Por el contrario, el afloramiento de un escarabajo tenebriónido del desierto (abajo) consta de filamentos muy delgados que tejen una red sobre la superficie cuticular (material abollado). La "capa límite" de aire que queda entre la superficie de la cutícula y la parte inferior de los filamentos se combina con la red cérica para proporcionar al tenebriónido una barrera hídrica que figura entre las más eficaces que se haya señalado en un animal.

sentan afloramientos céreos, cubiertas formadas por depósitos lipídicos que sobresalen de la superficie y se orientan aleatoriamente. A imagen de los vegetales que poseen ceras en la superficie, un animal con un afloramiento céreo suele ofrecer un aspecto escarchado. Tales afloramientos aparecen en diversos órdenes de insectos: Lepidópteros (mariposas nocturnas y diurnas), Himenópteros (avispa y abejas), Homópteros (cigarras y áfidos) y Hemípteros (chinchas).

Entre los investigadores que han descrito afloramientos céreos figuran R. D. Pope y Jennifer M. Cox, del Museo Británico de Historia Natural de Londres. Han aplicado la microscopía electrónica de barrido al estudio de los áfidos y las cochinillas harinosas. Esta línea de trabajo ha aportado información sobre las formas de las extrusiones céricas y los canales por los que se excretan. Pope y Cox descubrieron que, en la mayoría de las especies, las extrusiones describen formas y contornos similares a los de los poros que las secretan. Las cochinillas harinosas, por ejemplo, extruden ensortijados filamentos de cera por canales tubulares con tres a cinco agujeros, que producen largos filamentos huecos.

Sin embargo, la cera secretada por ciertas especies no retiene la forma original. Yo mismo descubrí que el escarabajo *Cryptoglossa verrucosa* secreta gotas amorfas de cera superficial por tubérculos, o nódulos en miniatura, de la cutícula. Expuesta a una humedad baja, la cera se rompe en numerosos filamentos delgados (de 0,14 micrometros de diámetro) que irradian desde la punta del tubérculo y que terminan uniéndose para formar una densa red alrededor de todo el escarabajo.

Los artrópodos con los afloramientos céreos más espectaculares, y quizá los de mayor extensión, son los escarabajos tenebriónidos del desierto de Namibia, en el suroeste de Africa. (Los escarabajos tenebriónidos son insectos de cuerpo duro, generalmente oscuros, comunes en los desiertos de todo el mundo.) Elizabeth McClain, de la Universidad del Witwatersrand en Johannesburgo, y Mary K. Seely, de la Desert Ecological Research Unit del Council for Scientific and Industrial Research de Namibia, han descubierto que los afloramientos céreos cubren toda o parte de la superficie corporal de 26 de las 46 especies estudiadas, formando a menudo intrincadas estructuras y adoptando diversos colores.

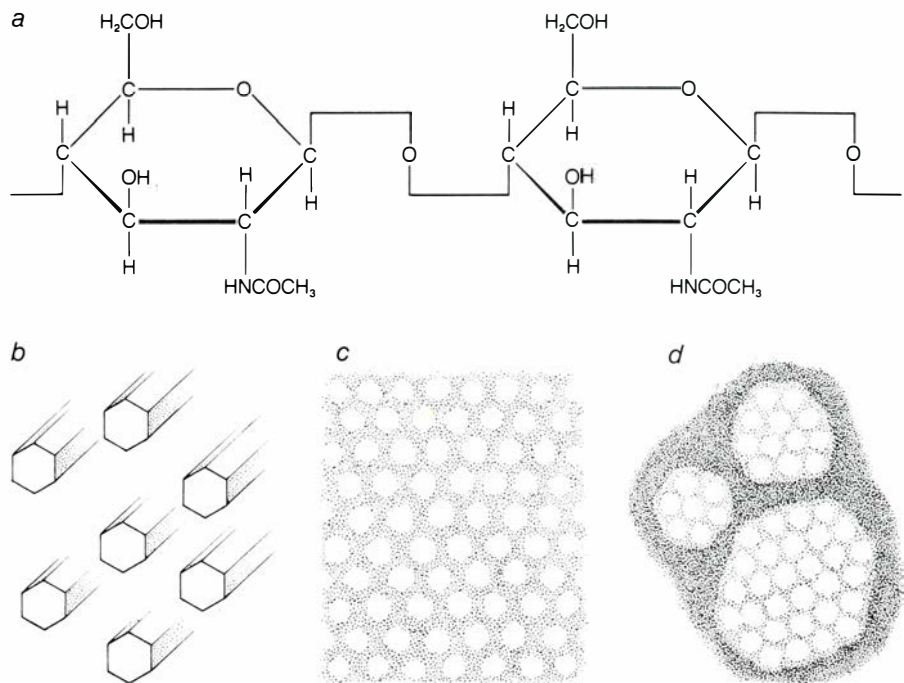
En una investigación conjunta, McClain, Seely y el autor descubrieron

que el porcentaje de especies con afloramientos céreos aumentaba a medida que el desierto frío y brumoso de la costa daba paso al desierto interior, más caluroso y seco. Hallaron, asimismo, que en una especie que habitaba ambas regiones la magnitud del afloramiento y su distribución sobre el tegumento aumentaban según el clima se volvía más cálido y seco. Los análisis de los componentes lipídicos de los afloramientos evidenciaron un predominio de los hidrocarburos, en su mayoría de la clase más repelente al agua: *n*-alcanos.

Con mis alumnos he demostrado también que los individuos de muchos grupos de artrópodos pueden incrementar la cantidad de cera de su superficie cuando las condiciones ambientales se tornan particularmente secas. Además, modifican la composición de los lípidos superficiales cuando las condiciones estacionales o de laboratorio dictan la necesidad de un ahorro hídrico redoblado. Por ejemplo, durante el verano, los tenebriónidos de la especie *Eleodes armata* producen más cantidad de hidrocarburos que en invierno y, al mismo tiempo, un mayor porcentaje de los de cadena larga. Hallamos igualmente que cuando se aclimatan escarabajos de condiciones invernales a las temperaturas y humedades propias del estío, la pauta de producción de hidrocarburos se asemeja a la de los escarabajos en verano.

La contribución de los lípidos a la retención hídrica constituye quizá la función más importante de los depósitos céreos superficiales, pero éstos cumplen en los artrópodos otras funciones. Las ceras de superficie pueden suponer un freno a la depredación. Por ejemplo, las hebras céreas, pegajosas, que revisten la superficie de las larvas de muchas mariquitas, constituyen una barrera física contra los ataques de los potenciales depredadores y la infestación por parásitos. Los elaborados diseños y coloraciones producidos por ciertas ceras superficiales podrían también proteger a los animales, por camuflaje, mimetismo o ambos. Las ceras de superficie podrían incluso poner a salvo a ciertos artrópodos de sí mismos; por ejemplo, los ensortijados filamentos de cera de la superficie de los áfidos y las cochinillas harinosas impiden quizá que esos animales queden atrapados por sus propias secreciones melifluas, viscosas, así como por las de sus vecinos.

El control de la temperatura constituye otra función potencial de los lípidos de superficie. La cera de color



6. COMPOSICION Y DISPOSICION de las varillas de quitina dibujadas a diferentes escalas. La quitina, presente sólo en la procutícula, es un polisacárido de cadena larga, compuesto de residuos repetidos del aminoazúcar *N*-acetilglucosamina; se muestra un fragmento (a). Las moléculas de quitina, dispuestas en filas de dos o tres, forman varillas hexagonales (b), cristalinas, representadas aquí con absoluta libertad de imaginación. Cuando se fotografía una sección transversal de la procutícula de un insecto con el microscopio electrónico (corte desde la superficie hacia abajo) y se amplía un millón de veces (c), los extremos de las varillas de quitina aparecen como zonas translúcidas (en blanco) rodeadas de proteína (sombreado claro). Asimismo, cuando se fotografía y amplía una sección de cutícula de cangrejo (d), la quitina ligada a proteínas se presenta agrupada en haces de diámetro diverso. El espacio que queda entre los haces (sombreado oscuro) está ocupado por proteína y calcio mineral. El calcio robustece la dureza de la cutícula del cangrejo.

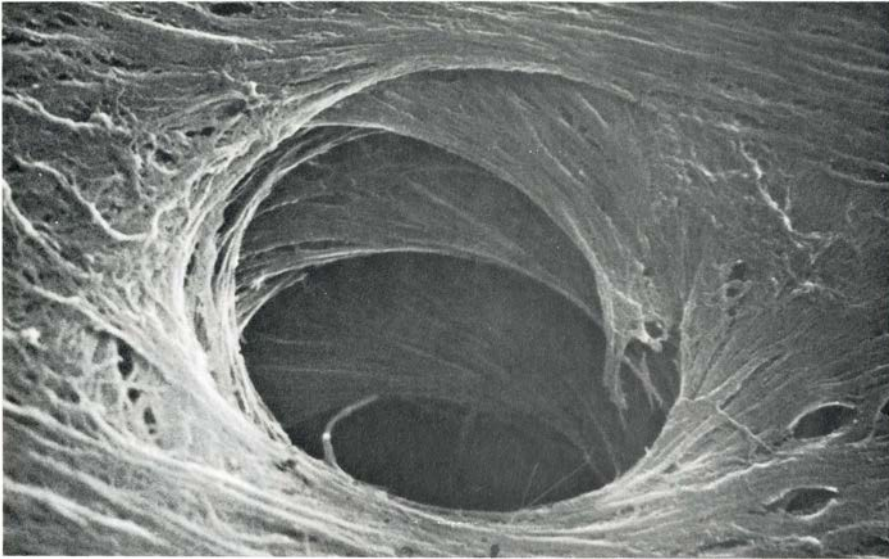
claro, distribuida uniformemente por la superficie de los artrópodos desertícolas, intensifica la reflexión de la radiación solar, lo que a su vez retarda el ritmo con que la temperatura corporal de los insectos pequeños se aproxima a los valores letales; esto permite a los animales prolongar su actividad en la superficie del desierto. Quizá las ceras de superficie reflejen la luz ultravioleta, potencialmente dañina, lo que explicaría, en parte, las elevadas densidades superficiales de ceras cuticulares halladas en insectos y arácnidos que viven a gran altitud.

Igualmente, puede que los lípidos repelan el agua que entraría en el animal desde el medio exterior. Por ejemplo, se ha apuntado que la gruesa cubierta cérica de los áfidos repele el agua durante los aguaceros. En esos animales, que no buscan abrigo durante las tormentas, las ceras actuarían de barrera de doble dirección contra el movimiento del agua a través del tegumento. Por último, se acumulan los indicios en el sentido de que las ceras de superficie son una fuente de señales químicas y visuales importantes para desencadenar el apareamiento u otros comportamientos.

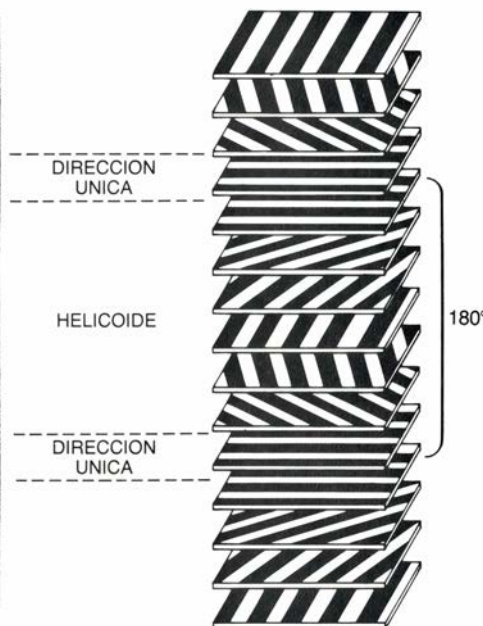
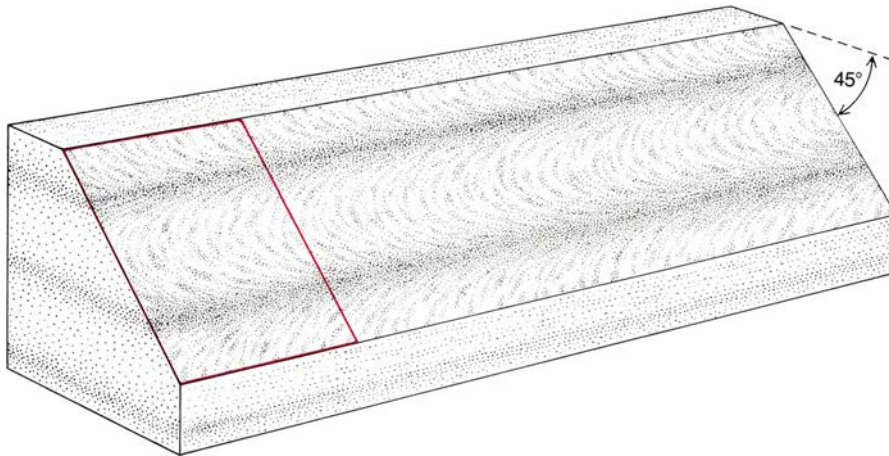
No cabe duda de que los lípidos cuticulares resultan de interés fundamen-

tal para la supervivencia de la mayoría de los artrópodos. Pero, ¿qué valor tienen los componentes más abundantes: la quitina y la proteína de la procutícula? Juntas, esas dos sustancias confieren a la cutícula sus propiedades mecánicas, que se han comparado con las de resistentes materiales bifásicos (la fibra de vidrio). La quitina aparece empaquetada en varillas que proporcionan resistencia a la tensión y a la vez son flexibles. La proteína se une fuertemente a la quitina y hace de matriz donde se encuentran inmersas las varillas de quitina, cementándolas y disminuyendo la flexibilidad de la cutícula. Combinadas, la quitina y la proteína permiten a la cutícula aguantar fuertes tensiones sin hundirse o resquebrajarse. La resistencia del complejo quitina-proteína se compara incluso favorablemente con la del acero: cuando se ensayan muestras de igual superficie, la resistencia a la tensión de este último es sólo 10 veces la de la cutícula.

Tal resistencia se debe en gran medida a las propiedades químicas y a la disposición de la quitina y la proteína en la procutícula. La quitina es una cadena larga, recta, de derivados cíclicos de la glucosa unidos por enlaces covalentes. Las cadenas contiguas de quitina se mantienen unidas por puentes



7. CONDUCTO DE UNA GLANDULA TEGUMENTARIA (círculo oscuro) rodeado de fibras de quitina, en una micrografía de la endocutícula del escorpión *Hadrurus arizonensis*, tomada por la cara inferior y aumentada unas 11.000 veces. La disposición helicoidal de las fibras permite a la cutícula soportar tensiones de gran intensidad. La micrografía fue tomada por Barry K. Filshie, con cuyo permiso la publicamos.



8. SECCION DE LA ENDOCUTICULA del tórax de un grillo, cortada en un ángulo de 45 grados con respecto a la superficie (arriba), y ampliada unas 50.000 veces en la micrografía electrónica (abajo, a la izquierda). Las bandas alternas, claras y oscuras, corresponden a capas de varillas de quitina dispuestas, respectivamente, de manera helicoidal y en una sola dirección. El modelo (abajo, a la derecha) ilustra la rotación de 180 grados de las láminas sucesivas. Una vuelta completa de 180 grados constituye una lamela.

de hidrógeno. La proliferación de puentes de hidrógeno reviste un notable interés: contribuye a la estabilidad y resistencia a la tensión de la quitina. Lo característico es que suponga del 25 al 50 por ciento del peso seco de la cutícula, aunque las estimaciones varían ampliamente.

En comparación con lo que sabemos ya de la quitina, queda mucho por descubrir sobre la composición y las configuraciones moleculares de las proteínas cuticulares. No obstante, los investigadores han averiguado que la proteína de la procutícula puede experimentar esclerotización, proceso que endurece la cutícula y hace, al mismo tiempo, que la proteína se torne insoluble en agua y que, por lo general, se oscurezca. Se admite que el endurecimiento resulta de la unión de cadenas proteicas contiguas mediante puentes formados por compuestos fenólicos o de otra clase. Y se ha propuesto que la pérdida de agua, que fomenta la unión de las cadenas proteicas, podría por sí sola justificar el endurecimiento.

El proceso de esclerotización, que sólo se presenta en la exocutícula, no es reversible y su amplitud varía mucho de un tipo de artrópodo a otro. Mientras que la cutícula de los terguitos, o placas que cubren los segmentos dorsales de las orugas, está muy poco esclerotizada, la de las mandíbulas (apéndices masticadores) de ciertos escarabajos lo están en alto grado. Tal esclerotización, junto con la precipitación de zinc y, a veces, de manganeso, concurre con la asombrosa capacidad de las mandíbulas del escarabajo para atravesar metales de plomo o cobre.

Las investigaciones de microscopía electrónica y de difracción de rayos X han proporcionado un conocimiento más profundo de la compleja disposición de la quitina y la proteína, justificadora en buena medida de la extraordinaria resistencia de la cutícula. De 18 a 25 moléculas de quitina, agrupadas en dos o tres filas, configuran una varilla cristalina, o microfibrilla. La proteína ligada a la quitina probablemente se une en la periferia de las microfibrillas; se cree que forma parte de la matriz proteica general. Las microfibrillas de quitina se orientan en dirección paralela a la superficie de la epicutícula y se disponen en láminas. Grupos de esas láminas componen las lamelas, o placas delgadas, en el seno de la exocutícula y la endocutícula. En algunos animales, como los cangrejos, entre las varillas de quitina se deposita calcio y otras sustancias.

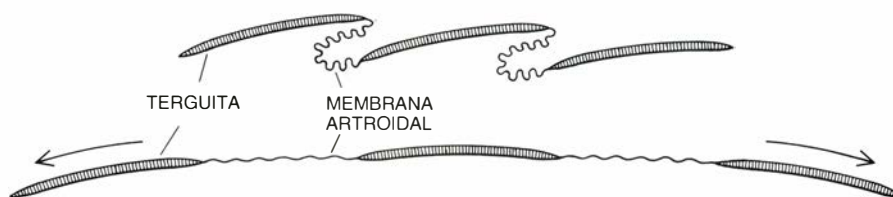
La disposición de las láminas en cada

lamela es de particular interés, pues forman una hélice. Yves Bouligand la descubrió en los crustáceos. Tiempo después, Anthony Neville describía otra estructura helicoidal en los insectos. En la exocutícula, cada lámina se coloca en un plano paralelo a la de por encima, pero girada, en sentido contrario a las agujas del reloj, en un ángulo pequeño y constante; la rotación completa de 180 grados da lugar a una lamela. En la endocutícula, los artrópodos pueden depositar microfibrillas helicoidales, pero, más a menudo, disponen láminas apiladas de varillas de quitina en una dirección entre parcial y completamente helicoidal. Las lamelas de la endocutícula suelen ser más gruesas que las de la exocutícula.

Combinadas con las microfibrillas orientadas en una sola dirección, las dispuestas helicoidalmente confieren resistencia a la cutícula, de una forma muy similar a como las capas de la madera multilaminar confieren resistencia a ese material. Las láminas rotadas un cierto ángulo reducen la formación y propagación de las grietas que, si así no fuera, podrían provocar que la cutícula cediera bajo la tensión. Friedrich Barth, de la Universidad de Frankfurt, ha descrito esa propiedad en la cutícula de la araña. En vez de propagarse, las grietas de la cutícula de araña se encauzan por la matriz proteica interfibrilar y así se detienen.

Neville mostró, a principios de los años 60, cómo se depositaban las capas alternas de microfibrillas helicoidales y de dirección única. Descubrió que las langostas depositaban láminas en una sola dirección durante el día y, en forma helicoidal, de noche. Demostró, además, que es la luz y la oscuridad, y no el paso del tiempo, lo que controla esa deposición. Criando langostas bajo luz u oscuridad constantes, inducía a los insectos a producir cutículas ora de dirección única, ora helicoidales. Desde entonces, otras investigaciones similares, han puesto de relieve análogas variaciones circadianas en otros muchos insectos; los escarabajos constituyen una excepción singular. El número de láminas, visibles al microscopio óptico, proporciona una estimación fiable de la edad de la mayoría de los insectos adultos.

Si todas las cutículas se construyen de forma similar, ¿por qué unas son rígidas y otras flexibles? Los cambios del tipo de proteína, de la proporción relativa de quitina y proteína y del grado de esclerotización pueden influir en el endurecimiento, la elasticidad y la capacidad de estiramiento de la cutícula



9. LA HORMIGA MELIVORA almacena alimento para la colonia en su hinchado abdomen, cubierto por una cutícula blanda, muy elástica (arriba). La cutícula blanda, llamada membrana artrodial, suele localizarse entre los terguitos y entre segmentos apendiculares. Como se muestra abajo, permanece plegada hasta que los terguitos o los segmentos se desplazan; entonces se estira. (La fotografía es del propio autor.)

en diversas partes del cuerpo. Dos clases de cutícula especializada acuden de inmediato a la memoria: la que contiene resilina, una proteína gomosa, y la que articula las placas o los segmentos apendiculares. Ambas son mucho menos rígidas que la armadura que vemos en la cara dorsal de los escarabajos.

La resilina se localiza en regiones donde la función exige elasticidad cuticular, como en los ligamentos de las alas de la langosta, las almohadillas de almacenamiento energético que facilitan el salto en la pulga y las pinzas del escorpión, que carecen de músculos extensores. El material elástico está compuesto de cadenas polipeptídicas enrolladas, unidas lateralmente por aminoácidos. Las redes de resilina enrollada se estiran cuando se aplica una tensión, recuperando la posición normal al desaparecer ésta.

La cutícula blanda —que recibe el nombre, más apropiado, de membrana artrodial— es muy flexible y elástica, en gran medida porque las proteínas no están esclerotizadas. Además, dicha membrana contiene más quitina que la cutícula rígida. Tal combinación de proteína no endurecida y quitina permite que la membrana se doble y tuerza con facilidad, si bien aguanta

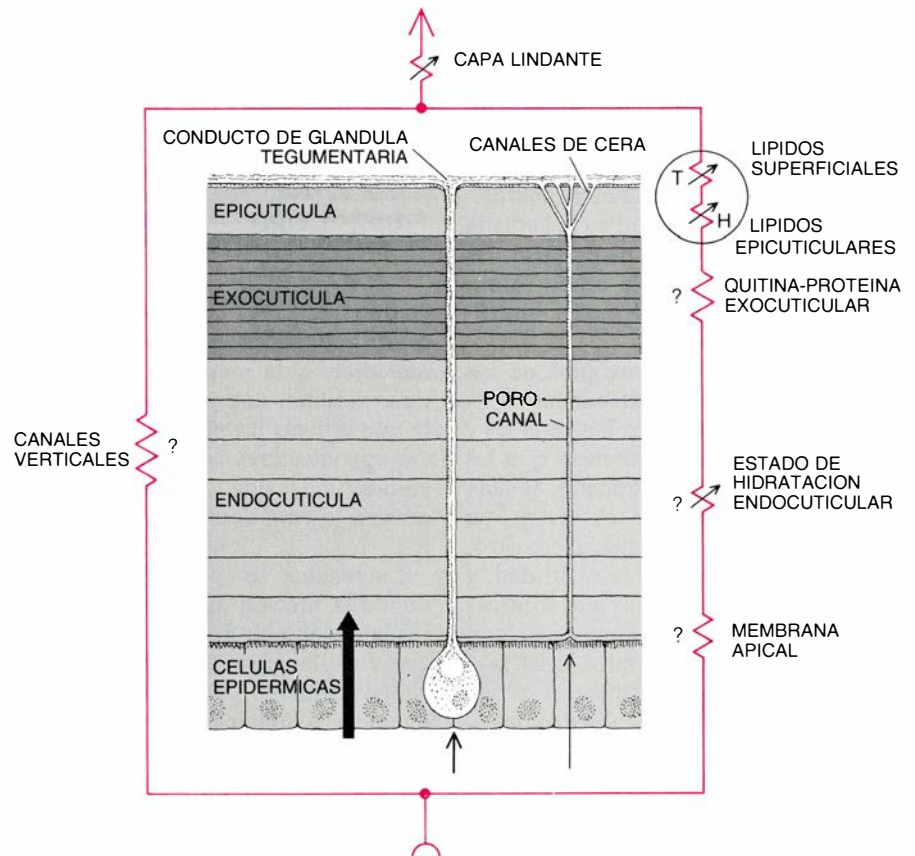
tensiones relativamente elevadas. Las hembras de langosta sexualmente maduras presentan una dilatación extrema de la cutícula blanda. La membrana abdominal situada entre los segmentos puede estirarse hasta 15 veces su longitud original, lo que permite a la hembra introducir el abdomen en lo hondo del agujero que ha excavado para los huevos. De forma análoga, el área abdominal de la termita reina aumenta muchas veces para acomodar la masa de huevos en desarrollo. Aunque no se conocen todas las interacciones moleculares que intervienen en el estiramiento, se cree que las microfibrillas de quitina se orientan en la dirección del mismo y que las proteínas de la matriz de la cutícula blanda son, en comparación, reactivas ante el agua.

Por más que ha avanzado el conocimiento de las propiedades estructurales, químicas, mecánicas y funcionales de la cutícula de los artrópodos, quedan por resolver varias cuestiones. Los investigadores desconocen mediante qué mecanismos los componentes cuticulares atraviesan la membrana superior de las células epidérmicas y se incorporan a la lámina cuticular apropiada. La función de las glándulas tegumentarias y la composición química de su secreción están sin aclarar. Nadie

ha desvelado todavía el funcionamiento de las estructuras sensoriales que sobresalen de la cutícula, en particular los receptores que se supone reaccionan ante compuestos químicos del medio ambiente o ante cambios de temperatura y humedad. Mucho queda por averiguar acerca de las proteínas en que está embebida la quitina, y sobre los cambios físicos y químicos que experimenta cuando se esclerotiza.

Los investigadores tratan, asimismo, de explicar mejor la naturaleza y el modo de acción de la barrera cuticular, impermeable. Es evidente que los lípidos asociados con la epicutícula ofrecen la principal resistencia a la pérdida de agua, y que tal resistencia se complementa con la delgada capa de aire no renovado que resta en la vecindad inmediata de la superficie exterior de la cutícula. Poco se sabe de la contribu-

ción a esa barrera por parte de la exocutícula, la endocutícula y las células epidérmicas subyacentes. Tampoco se conoce la localización de los lípidos específicos en el seno de la epicutícula, ni de qué manera interactúa cada especie lipídica con otros componentes cuticulares lipídicos y no lipídicos para influir en la retención hídrica. Están en curso investigaciones que, por una parte, miden la pérdida de agua por la cutícula en artrópodos intactos, valiéndose al efecto de cápsulas en miniatura sujetas a su superficie, y, por otra, la miden en trozos aislados de la misma. Los resultados de los experimentos quizás ayuden a responder algunos de los interrogantes planteados y, en combinación con investigaciones bioquímicas y morfológicas, habrían de facilitar, a la larga, una descripción pormenorizada de la estructura y funcionamiento de la cutícula de los artrópodos.



10. BARRERAS CONTRA LA PERDIDA DE AGUA a través del tegumento de los artrópodos (constituido por la cutícula y la epidermis), en el seno de dicha cutícula. El flujo de agua a través del tegumento se ilustra mediante el símil de un circuito eléctrico (*línea de color*). En los esquemas de los circuitos, el símbolo de la resistencia (*línea en zigzag*) denota que algo se opone al paso de la corriente eléctrica; en este caso, el símbolo significa que el elemento reseñado a continuación se opone al movimiento del agua. La flecha que cruza el símbolo indica que la resistencia a la pérdida de agua varía con el tiempo; las letras enmarcadas en un círculo señalan que la función de barrera del elemento en cuestión está condicionada por la temperatura (*T*) y la humedad (*H*). El signo de interrogación da a entender que el elemento contribuye posiblemente a la resistencia al paso del agua. A pesar de la serie de barreras, difunde algo de agua a través de la membrana apical (superior) de la epidermis (*flecha gruesa*) y por las capas de la cutícula. Aunque una endocutícula con un contenido hídrico bajo tiende a oponerse a esa difusión, los lípidos intraepicuticulares y los depositados en la superficie de la cutícula han demostrado ser el principal medio de resistencia a la pérdida de agua. La delgada capa de aire situada encima mismo de la superficie cuticular (*capa lindante*) complementa la resistencia que proporciona el tegumento. Algo de agua puede atravesar la cutícula por los conductos de las glándulas tegumentarias y por los complejos de canales de cera y los porocanales (*flechas delgadas*). No obstante, unos y otros están revestidos por compuestos que pueden impedir el movimiento del agua. Los canales contribuyen también a la resistencia contra la pérdida de agua que brinda la cutícula.

Juegos de ordenador

Sublime vuelo de la imaginación sobre una desértica base de datos

A.K. Dewdney

Estudié con nerviosismo el cuadro de instrumentos de mi Cessna 182. ¿Sería una locura lanzarme, sin instrucción previa, a un vuelo en solitario? ¿No sería mejor buscar una mano experimentada para remontar el vuelo? Fuera, el campo de aviación de Meigs, Chicago: un desolado panorama donde no se veía un alma; ni siquiera un mecánico salido a fumar un cigarrillo y tomar un poco el sol. En esta misión de locos, mi único compañero era el manual de vuelo que descansaba en mi regazo. Diez minutos había dedicado yo a leerlo.

Imagino que habría tenido más confianza en mí mismo de tener en mis manos un volante o una palanca de mando. De niño había visto *Temerarios del Aire* no menos de diez veces; ya conocía, pues, las acciones fundamentales. Pero este aeroplano era, no cabía duda, mucho más avanzado. Se controlaba totalmente desde un teclado, situado frente a mí.

Con un suspiro me dirigí a la página 46 del manual. La tecla F2 servía para cerrar la mariposa del acelerador; la F4, para abrirla por completo. No queriendo excederme en mi temeridad, tanté el efecto de F2. El suave ronquido del motor se elevó un semitono. La pista comenzó a deslizarse hacia mí; súbitamente, me sentí invadido por el pánico. El avión se estaba desviando, y amenazaba salirse de la pista de cemento. En mi ignorancia no me había preocupado de leer nada acerca del timón de dirección ni de la rueda del morro. Mi única salvación eran los alerones, las teclas marcadas 4 (inclinación a la izquierda) y 6 (inclinación a la derecha). Con gran sorpresa mía, una de ellas me fue devolviendo lentamente al centro de la pista.

A tan sólo 1000 metros a proa se vislumbraba el profundo azul oscuro de las aguas del lago Michigan. Más gas. F2F2F2F2. Más gas todavía. El motor rugía vigorosamente; empero, el avión se negaba a alzar el vuelo. La pista corría cada vez más rápidamente bajo mis

ruedas. Sentí que otra oleada de pánico se apoderaba de mí. En rápidas instantáneas, mi vida se proyectó ante mis ojos. Escenas de mi niñez. Héme allí, a los mandos de un aeromodelo, controlado tan sólo por los timones de cola. ¡El timón de profundidad! Consulté febrilmente “timón de profundidad” en el manual. Ese dispositivo controla el ángulo de ataque del aeroplano; el efecto de aumentarlo es alzar el morro del avión. Pulsé la tecla rotulada 2 justo a tiempo de evitar una sepultura acuática. La sobria geometría de tierra y agua fue retrocediendo progresivamente. ¡Volaba! El avión parecía elevarse por voluntad propia. La panorámica de la orilla occidental del lago Michigan fue ampliándose paulatinamente. Durante algún tiempo continué volando en dirección norte, hipnotizado por mi hazaña.

Como todos los lectores habrán adivinado ya, la cabina era el estudio de mi casa y, los mandos, el teclado de mi ordenador personal, con el que estaba ensayando un programa de simulación de vuelo. Empero, lo familiar del ambiente no rebajó en modo alguno la sensación de estar viviendo una aventura; el hecho de que tanto el avión como el paisaje fueran meras simulaciones sirvió para excitar más mi imaginación. Aquí era posible ensayar lo que jamás osaríamos en un avión de verdad. También imaginarias serían las facturas por daños. Incliné el avión hacia el suroeste, en dirección a Chicago. Tenía yo la intención de dar una pasada a poca altura sobre Michigan Avenue, e impresionar con mi proeza a los automovilistas. Según un reloj de mi cuadro de mandos eran las 4.30, el comienzo de la hora punta de la tarde.

Al aproximarme a Chicago tuve la impresión de que algo iba terriblemente mal. Apenas se divisaban unos pocos edificios a lo largo de la ribera del lago; las calles, vacías y sin tráfico. No había absolutamente nadie. ¿Se habría desencadenado una guerra nuclear? Me dí cuenta de que había con-

fundido con un reloj las dos manecillas del altímetro; pero ni siquiera el descubrimiento de que aún faltaba mucho para las 4.30 podía explicar la desolación de la gran metrópoli. De mala gana, me vi obligado a admitir que en el programa de simulación de vuelo no había lugar para la gente. Su base de datos estaba ya atiborrada de paisajes de Norteamérica, por no mencionar los detalles geográficos necesarios para la simulación de cuatro áreas metropolitanas, y más de 20 aeropuertos.

En vuelos más recientes esa soledad me ha agobiado menos. Sencillamente, volar resulta apasionante. Y al parecer, son muchas las personas de este sentir. El programa se llama FLIGHT SIMULATOR, y se ha mantenido durante muchos meses en los puestos cimeros de las listas de máximas ventas de *software* recreativo. Se dispone de otros muchos programas de simulación de vuelo, tanto comerciales como gratuitos; empero, tras FLIGHT SIMULATOR y un buen número de otros inductores de pánico se halla una sola mano: la de Bruce A. Artwick, ingeniero de programas de Champaign, Illinois. Quizá sea Artwick más responsable que nadie del despegue de los programas de simulación de vuelo ejecutables en ordenadores personales o domésticos. Desde hace mucho, la simulación de vuelo ha sido provincia casi exclusiva del entrenamiento de pilotos [véase “Simulación del vuelo”, por Ralph Norman Haber, en este mismo número], pero ahora, gracias a Artwick y a otros programadores, son prácticamente propiedad de todos.

Pensemos en todo lo que un simulador de vuelo ha de efectuar para mantener en el usuario la voluntaria ilusión de verismo. Ante todo, tiene que crear y recrear, al ritmo de varias veces por segundo, una panorámica que se vislumbra desde un determinado punto del cielo. Conforme el avión simulado recorre diligentemente sus cielos informáticos, ese punto de vista va cambiando, y es preciso recalcular el aspecto del paisaje. Además, para cada punto de vista tiene que haber un ángulo de visión adecuado, que se deduce de la simulación de la física del vuelo del avión. Por ejemplo, al tiempo que el avión se inclina y vira es preciso ir ajustando en consecuencia el correspondiente punto de vista y el ángulo de visión. El ciclo fundamental de cómputo saca partido de una variedad de trucos y simplificaciones, fascinantes por sus propios méritos.

En FLIGHT SIMULATOR, la base de datos geográficos es fundamental. Consta

de una vasta lista de los objetos necesarios para confeccionar una imagen de los panoramas que se podría desear sobrevolar (o contra los que uno no quisiera estrellarse). Se logra acceder a la escena de nuestro vuelo recorriendo en sentido descendente una jerarquía de informaciones. Un bloque de memoria titulado EE.UU. contiene nombres de regiones como Chicago, Nueva York o Seattle. A continuación se especifica la posición de la aeronave, dando una terna de coordenadas: la latitud, x , la altura sobre el nivel del mar, en metros, y , y la longitud, z . Seguidamente, FLIGHT SIMULATOR compara esas coordenadas con los límites que determinan cada una de las regiones del bloque correspondiente a EE.UU. Por ejemplo, si x , z corresponden a un punto de la zona de Chicago, el programa ejecuta una operación llamada "cargar la base de datos": se lee en el disco la lista que describe el área de Chicago y se carga con ella la memoria interna del ordenador.

La primera vez que incliné el avión y lo hice virar hacia Chicago no se divisaba edificio alguno. Poco después saltó a la vista la Torre Sears. Más

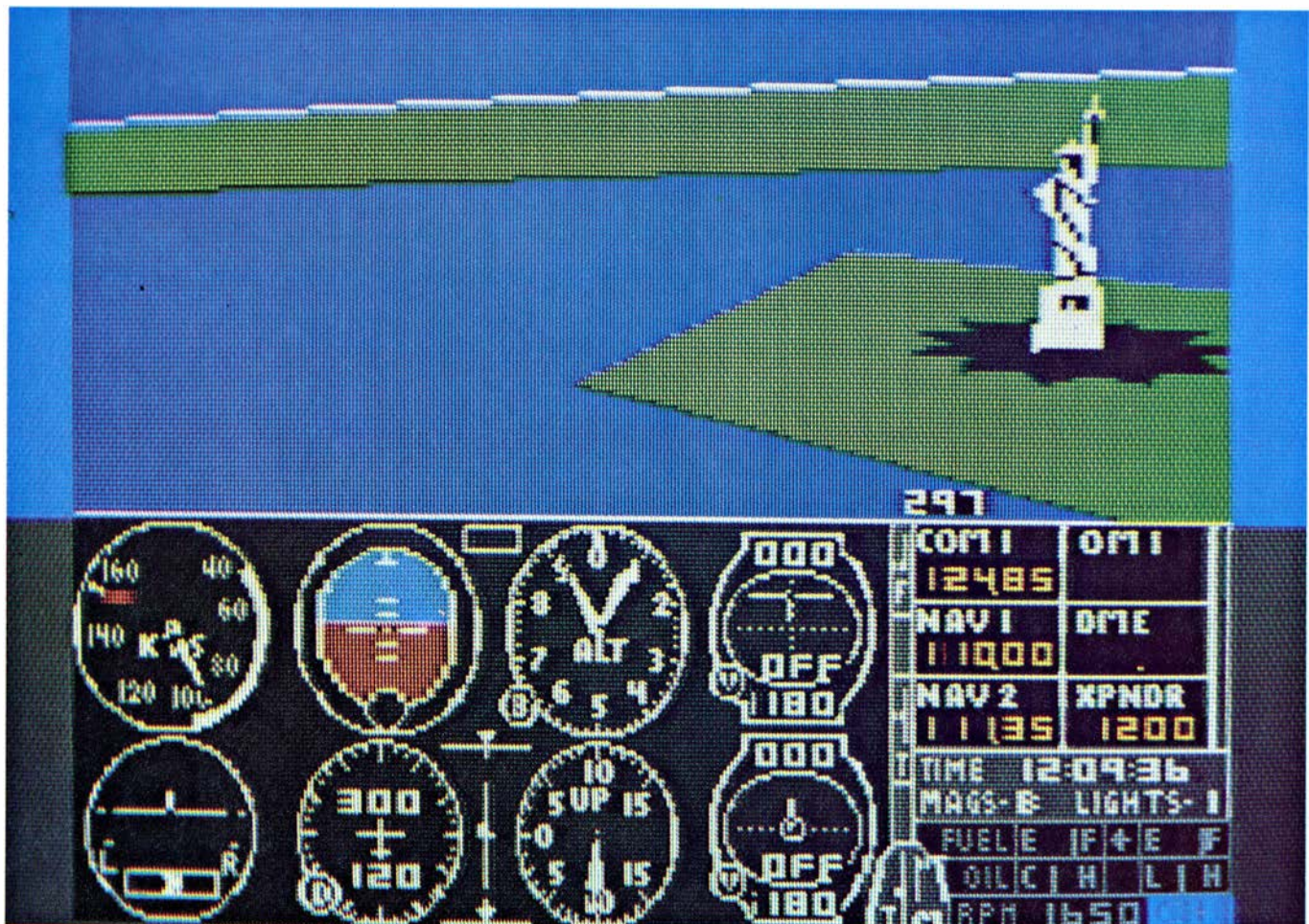
tarde fue adquiriendo detalle. Tal es, pues, la estrategia de FLIGHT SIMULATOR para mantenerse dentro de los límites de velocidad y memoria de los microordenadores: no mostrar perfiles del paisaje hasta que resultan verdaderamente necesarios. El programa dispone de dos rutinas de comprobación especiales, que deciden la aparición o desaparición de cada peculiaridad del panorama. La primera de ellas, *ifin2d*, examina solamente dos de las coordenadas del avión, la latitud y la longitud. He descrito ya de qué modo asocia una gran región geográfica a las dos coordenadas.

La segunda de estas rutinas, *ifin3d*, determina si hay en el paisaje circundante algún rasgo característico lo suficientemente próximo para que merezca representarlo en la pantalla. Al irme acercando a Chicago, *ifin3d* recalculaba continuamente mi distancia tridimensional a ciertas referencias del centro comercial de la ciudad. Al aproximarme hasta 12.800 metros de la Torre Sears, brotó de repente en el horizonte una diminuta reproducción del edificio, un serpeante apilamiento de píxeles, allá en la lejanía. Más cerca ya,

a la distancia de 7680 metros, se hicieron súbitamente visibles nuevos detalles. Para cada nuevo conjunto de coordenadas, FLIGHT SIMULATOR revisa a toda velocidad la lista de objetos a mostrar, y verifica si alguno satisface los criterios de presentación establecidos por *ifin3d*. Cuando un objeto supera el examen, el programa lo dibuja, dándole la apariencia que le corresponde desde el actual punto de vista. Si no lo supera, no es representado, y el programa salta al objeto siguiente de la lista.

En general, cada objeto y cada rasgo del panorama simulado está definido por una lista de puntos, líneas y superficies. Dado que los cuadros que formarán la experiencia visual se computan al ritmo de cinco por segundo, con rapidez suficiente para aprovechar la persistencia de la visión, es preciso dibujar las líneas y superficies en el mínimo tiempo posible. Así, hasta las más elementales operaciones gráficas del programa tuvieron que diseñarse con gran cuidado. Artwick los ha descrito en un libro fascinante, *Microcomputer Displays, Graphics, and Animation*.

Por ejemplo, el método fundamental



1. La Estatua de la Libertad, desde la cabina de FLIGHT SIMULATOR

para trazar rectas evita al máximo las operaciones de multiplicación y división, porque un micro-ordenador tarda en efectuarlas entre 10 y 100 veces más que las sumas y restas. El método de trazado se funda, en cambio, en un cuidadoso análisis del costo computacional de cada instrucción. El sagaz algoritmo para trazado de rectas resultante está integrado, en esencia, por cuatro instrucciones nada más: una de adición, una de comprobación, una de bifurcación condicional y una de dibujo de un píxel. Supongamos que en una recta de pendiente (positiva) $1/4$ acaba de dibujarse el punto (a, b) . El programa entra entonces en un bucle que va sumando repetidamente 1 a la abscisa a , incrementa en $1/4$ una suma especial llamada error de barrido horizontal y revisa después el valor de este error. Cuando el error de barrido es mayor o igual que un entero positivo, el programa sale del bucle y dibuja el punto siguiente, que en este caso sería el $(a+4, b+1)$.

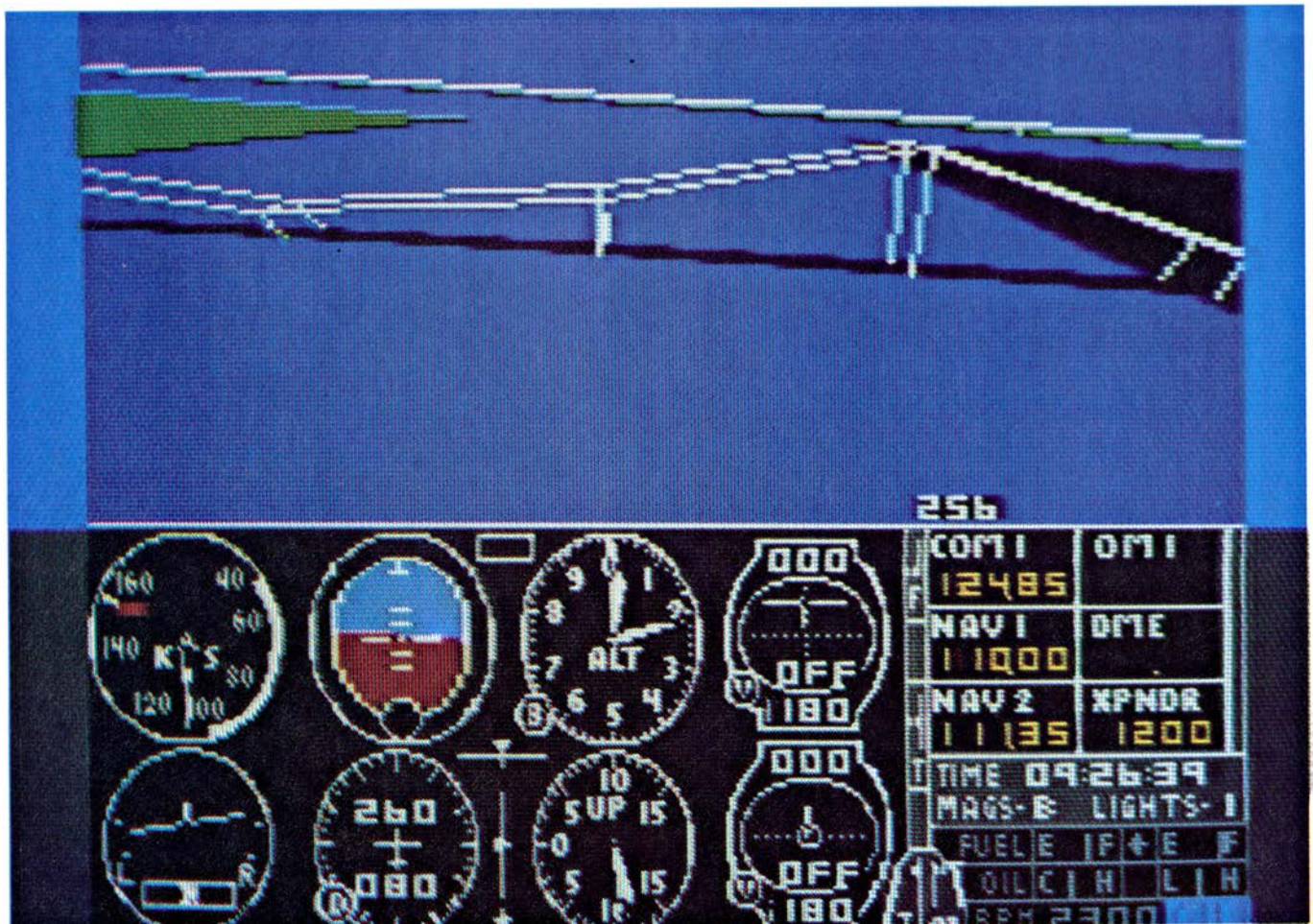
La descripción del procedimiento por el que FLIGHT SIMULATOR traza superficies parece fastidiosa, pero es de

ejecución sumamente rápida. Exponámosla brevemente: el programa traza el polígono que delimita la superficie, y rellena después su interior. Una vez calculada la forma del polígono, la rutina gráfica comienza por detectar qué líneas del barrido de la pantalla del monitor pasan a través del polígono. Para cada una de esas líneas se identifican también qué lados del polígono serán interceptados, que se clasificarán después según el orden en que la línea de barrido los atraviese, de izquierda a derecha. Seguidamente, la rutina examina cada píxel, es decir, cada elemento de imagen, de la línea de barrido, en orden de izquierda a derecha. Cuando la línea encuentra el primer borde del polígono comienza a dibujar puntos adecuadamente coloreados, correspondientes a la superficie que se está representando. Cuando la línea encuentra el lado siguiente, deja de dibujar puntos. Al llegar al lado siguiente, vuelve a comenzar.

La técnica de trazado por activación y desactivación de tramos de las líneas de barrido se basa en un teorema fundamental de la topología plana, a sa-

ber, que cualquier polígono cerrado divide al plano en dos regiones disjuntas, una, el polígono más su interior; otra, el exterior. Consiguientemente, cualquier recta que atraviere un lado del polígono ha de pasar desde el interior (la superficie a representar) hasta el exterior (puntos no situados en tal superficie), o viceversa. Casi todas las superficies que se dibujan en FLIGHT SIMULATOR están limitadas por polígonos muy sencillos. Por ejemplo, al poco de haber salido yo del aeródromo de Meigs, la ribera del lago Michigan se extendía desde la vertical del aeroplano hasta el distante horizonte. Por el camino, la ribera seguía una bahía poligonal, parcialmente cerrada por una lengua de tierra que apuntaba hacia el norte. En la pantalla, las líneas de barrido correspondientes a las azules aguas de la bahía estaban interrumpidas por la lengua de tierra, y luego continuaban llenando el cuerpo principal del lago.

Los redactores de programas de presentación gráfica han dedicado no pocos esfuerzos a meditar en el problema de las líneas ocultas. ¿Cómo ha de ha-



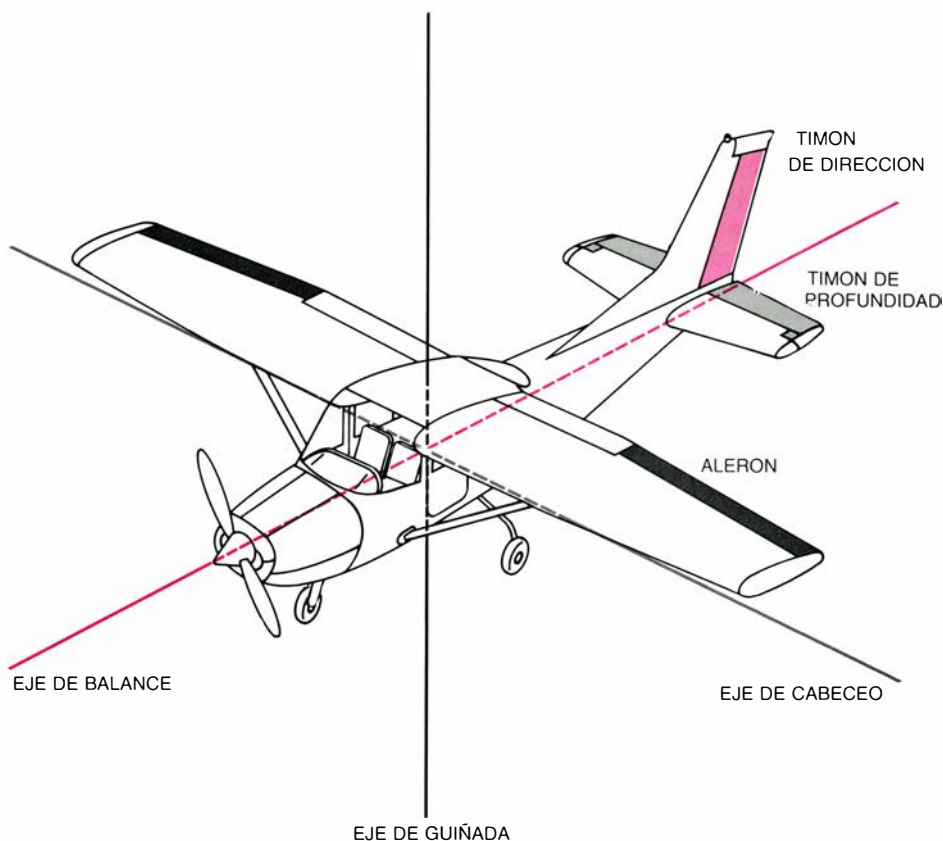
2. Desafiando a la muerte, tratamos de pasar bajo el puente de Manhattan

cer un programa para dibujar un objeto opaco tridimensional, de modo que solamente queden a la vista las caras más próximas al observador? Algunos métodos comportan lentos procesos de resolución de ecuaciones, carga computacional que FLIGHT SIMULATOR soporta mal. La solución de Artwick, aunque apenas es aplicable más que a panorámicas simples, consiste en dibujar de modo tal el objeto entero que sea la cara más próxima al observador la trazada en último lugar. Las partes del objeto no visibles desde la perspectiva del observador quedan borradas por las partes que sí lo son. La representación de las torres gemelas del World Trade Center de Nueva York nos proporciona un bonito ejemplo de esta técnica, un tanto burda, cierto, pero eficaz. Cualquiera que sea el ángulo con que se observen, los lados más cercanos de cada edificio oscurecen a los más alejados y, de este modo, la torre más cercana eclipsa a la más distante.

Tras descubrir que Chicago se encontraba despoblado, opté por dirigirme de vuelta al campo Meigs. El legítimo propietario podría estar inquietando por el paradero de su avión. Empero, aún me quedaba mucho por aprender, y no quería renunciar a ello. Por una parte, me resultaba embarazoso dominar tan pocos mandos; por otra, aún no había intentado ninguna acrobacia. Volví a sobrevolar el lago Michigan para ensayarla.

Mis controles favoritos eran los alerones. Al pulsar la tecla correspondiente al alerón izquierdo, el avión se inclinó hacia la izquierda; frente a mí, el horizonte se inclinó hacia la derecha, al tiempo que el paisaje parecía deslizarse suavemente por la pendiente. De acuerdo con las leyes de la aerodinámica, el morro del Cessna giraba regularmente hacia la izquierda. Volví a nivelar el avión y a volar en línea recta. Pulsé unos cuantos 8, y casi sentí físicamente la caída del morro. El horizonte y el paisaje subieron hasta llenar totalmente el parabrisas. El avión picaba. El indicador de velocidad del aire rebasó los 250 kilómetros por hora. Tanteé los mandos del timón de dirección. La tecla de adición movió el timón ligeramente hacia la derecha, y el avión comenzó a girar de mala manera. Volví a centrar el timón y contemplé cómo subía hacia mí el paisaje con engañosa lentitud. Era el momento de intentarlo.

Los pilotos intentan el rizo muchas menos veces que los programadores. Sin embargo, sabía instintivamente que



3. Tres tipos de superficies de control para hacer girar un aeroplano

para realizar la maniobra me haría falta alcanzar alta velocidad respecto al aire. Primero descender; luego, elevarme hasta alcanzar la posición invertida. Aunque la idea que yo me hacía de tirar con decisión hacia atrás de la palanca no era precisamente la de pulsar teclas, pulsé la tecla 2, como estaba mandado. El avión salió rugiendo de su picado, pasó por un momento a vuelo horizontal y continuó después ascendiendo y penetrando en el empíreo de azul macizo. Contemplé hundirse el horizonte por la parte baja del parabrisas y esperé. No tenía la menor idea de si llegaría a conseguirlo. Todo era silencio. ¿Entraría en pérdida y me desplomaría al suelo? Mis instrumentos no me servían de ayuda: tan sólo tenía una vaga idea de para qué servían.

De pronto, comenzó a descender por la pantalla un paisaje vuelto cabeza abajo, en lo alto el verde suelo y el cielo azul en lo bajo. ¿Lo habría conseguido? Estaba yo demasiado confuso para responder a mi propia pregunta. Me mantuve inflexible. Ahora, todo cuanto tenía ante mí era suelo. Después, el horizonte se elevó hasta el nivel que le correspondía. Probé a bajar el morro, para no entrar en otro rizo. El horizonte osciló y después se estabilizó. ¡Lo había conseguido! Cada vez

lo veía con más claridad: yo era una de esas personas dotadas, capaces de volar con destreza sin apenas instrucción. Frente a mí apareció enseguida el campo Meigs. Sólo me quedaba aterrizar y ducharme.

La pista principal se extendía de sur a norte. Dado que me encontraba al suroeste del campo, me propuse volar hacia el oeste, virar después al norte, una vez en la prolongación de la pista. Sin saber por qué, el plan se torció. Por más que lo intenté, no logré alinearme con la pista, y además, me aproximé al campo desde una altura a todas luces excesiva. Era como una de esas pesadillas que van de mal en peor. En mi ansia por perder altura rápidamente incliné demasiado el morro, mientras seguía luchando por conseguir unos cuantos metros de desplazamiento hacia el este. Lo que pasó es que la pista se salió de la pantalla. Perdí el horizonte. Se puso a sonar un timbre de alarma, al tiempo que el suelo ascendía rápidamente hacia mí. ¡Maldición! Me había estrellado. Supe que me había estrellado porque el parabrisas se llenó de grietas, mientras que sobre ellas aparecía el mensaje "¡CRASH!" ¿Me había matado? Sería una gran desgracia que la base de datos de Chicago fuera a perder su único habitante.

Para simular estas aventuras, FLIGHT SIMULATOR tiene que recalcular continuamente el aspecto de la panorámica, vista desde la cabina del Cessna. Los controles de un avión pueden agruparse de acuerdo con los tres tipos de rotación que inducen [véase la figura 3]. Los alerones hacen girar el avión en torno a un eje que se extiende desde el morro a la cola, el eje de balance. Los timones de profundidad provocan la rotación de la aeronave en torno a un eje paralelo a las alas, el eje de cabeceo. Y el timón de dirección tiende a hacer girar al avión en torno al eje de guiñada, una recta vertical respecto del piloto. Si la posición actual del avión está dada por las coordenadas x , y , z , ¿cómo determinará el programa dónde se encontrará una fracción de segundo más tarde?

La dirección del morro del Cessna, y su velocidad respecto del aire, definen un vector en cada momento, y el vector genera una nueva posición. El programa calcula una nueva dirección para el avión —consiguientemente, un nuevo ángulo de visión— a partir de las ecuaciones de vuelo. En cada ciclo de presentación, los datos iniciales de las ecuaciones tienen en cuenta los valores que en ese momento arrojan los con-

troles, y las condiciones ambientales, tales como presión atmosférica, densidad del aire, velocidad del viento y temperatura. Las ecuaciones de vuelo introducen las características de vuelo del avión y aplican las leyes físicas a las entradas. Se suman vectorialmente las fuerzas de empuje, gravedad, sustentación y de resistencia al avance y se toman en consideración los efectos inerciales debidos a la masa del avión y los correspondientes a su forma geométrica. La salida de las ecuaciones es la nueva dirección de vuelo.

Por ser demasiado complicadas, no pueden resolverse las ecuaciones con rapidez; por ese motivo, Artwick las ha remplazado por tablas de valores. Una tabla, pongamos por caso, da la sustentación del avión correspondiente al ángulo de ataque; los ángulos están dados en incrementos de una décima de grado. El uso de tablas presenta una ventaja adicional: pueden cambiarse las características de vuelo sin más que cambiar las tablas; no es necesario deducir nuevas fórmulas.

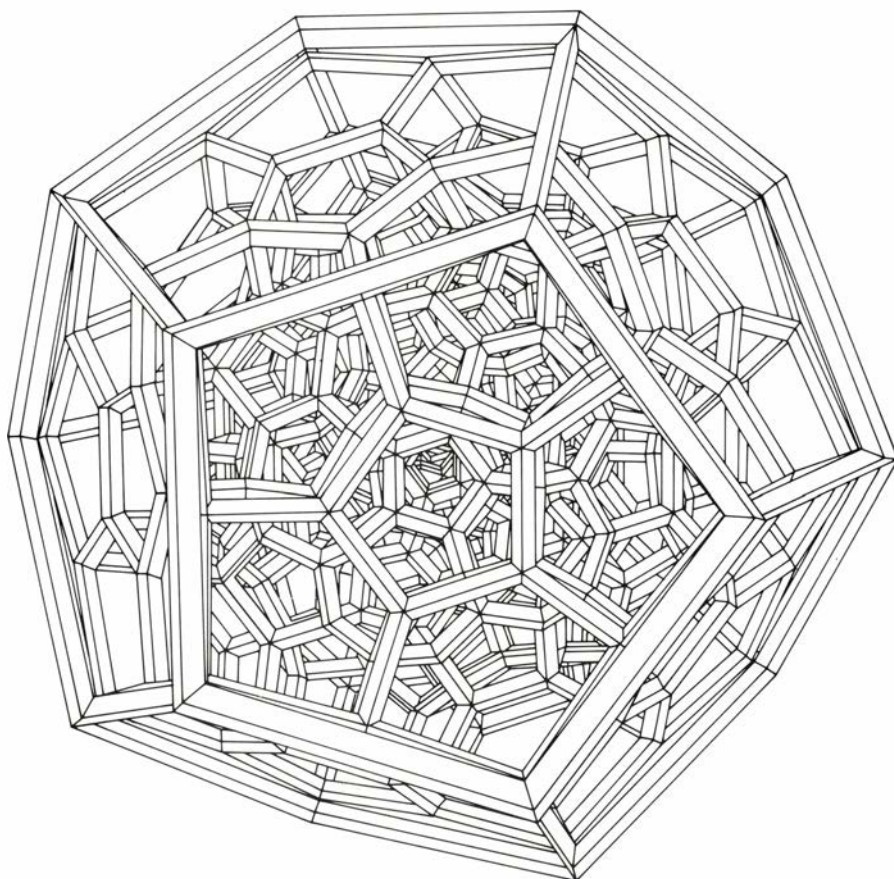
Los lectores que estén pensando en un proyecto piloto en la dirección vertical pueden adquirir un programa de simulación de vuelo para cualquiera de las versiones más populares de orde-

nador doméstico. Ha sido la mano de Artwick la que ha guiado la confección del programa más conocido, vendido por la Microsoft Corporation, de Bellevue, Washington. Artwick ha desempeñado también un papel importante en el desarrollo de un programa llamado FLIGHT SIMULATOR II, que vende Sublogic Corporation, de Champaign, Illinois. De ambos programas hay versiones para los ordenadores personales Apple II, IBM, Commodore 64 y Atari. Se ha anunciado recientemente una tercera producción de Artwick para el Macintosh.

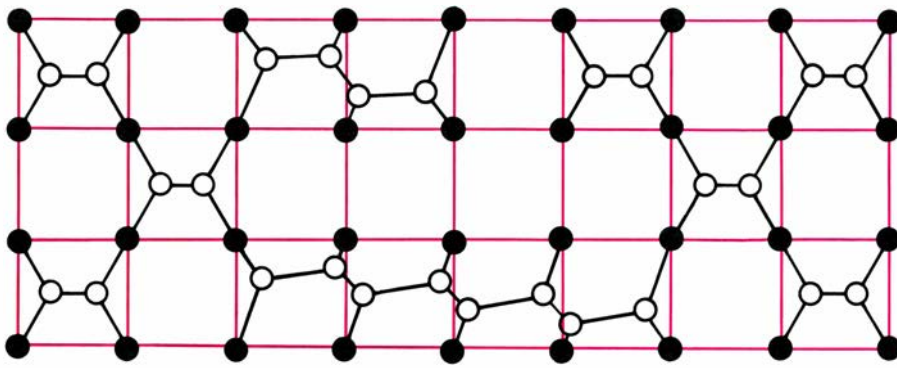
Al cabo de unos cuantos vuelos “de estreno”, quizá guste el lector de probar algunas de las espeluznantes aventuras propuestas en un nuevo libro de Charles Gulick, modestamente titulado *40 Greath Flight Simulator Adventures*. He de agradecer a David Wehlau, de Waltham, Massachusetts, el darme noticia de ese libro. Cada aventura comienza cuando el usuario pone en funcionamiento uno cualquiera de los programas de simulación ya mencionados y dactilografía los datos necesarios, tomados del libro. Entre tales datos se cuentan latitud, longitud, altura, posiciones de los mandos, hora del día y otros similares.

Podemos encontrarnos instantáneamente a unos cuantos cientos de metros del puente de Manhattan, siguiendo un curso que nos lleva a pasar directamente por debajo de él. En otra aventura, titulada “La palanca no responde. Estamos cerca de San Clemente”, nos encontramos 1500 metros de altura, sobre la isla de San Clemente, cerca de las costas de California, y el motor acaba de fallar. ¿Lograremos aterrizar en la isla, planeando en vuelo libre, sin motor? Una tercera aventura se titula “Zona crepuscular”. Estamos aparcados en una pista de hierba. Según el reloj del cuadro de instrumentos pasan tres minutos de la medianoche; sin embargo, en el exterior hay luz. En lo que se alcanza a ver desde las ventanillas laterales y traseras, el avión es enteramente negro. El despegue es lento y, una vez en el aire, ni desde las ventanillas ni por el radar alcanzamos a ver panorama alguno. ¿Qué debemos hacer? Personalmente, prefiero una base de datos desierta.

La “guerra nuclear”, que fue tema inaugural de esta sección (julio de 1984) se habrá librado a finales de verano en el litoral levantino... estadounidense. El Computer Museum de Boston tenía previsto dar cabida a la pri-



4. Proyección del hiperdodecaedro tetradimensional, creada por Edward B. Becker



5. Mínimo de los árboles de Steiner conocidos para el rectángulo de 4 por 9

mera guerra nuclear internacional en los últimos días de agosto. Los programas más sagaces dejarán inutilizables a los más débiles, destruyendo en ellos instrucciones vitales. El vencedor (humano) será el campeón de guerra nuclear durante un año.

Los programas de “alto cociente intelectual”, como el HI Q, que fueron tema del artículo de mayo, indujeron a muchos lectores a probar mano en el “minitest”. Otros llegaron incluso a preparar programas propios. Los métodos expuestos en el artículo se inspiraban en las diferencias finitas; el de Miguel A. Lerma, de Madrid, calcula los coeficientes c y k resolviendo un sistema de ecuaciones. Paul A. Cook, de Sudbury, Massachusetts, se encuentra entre quienes se preguntaron cómo llegó Marcel Feenstra, el creador de HI Q, a establecer un cociente intelectual de 160 para su programa. Según explica el propio Feenstra, la idea se la dio un amigo australiano, Chris Harding, que ostenta el récord Guinness de más alto cociente intelectual identificado hasta la fecha. Para poner a prueba el programa, Harding sugirió aplicarlo a la colección de todas las tareas de completación de sucesiones que aparecían en el conocido libro de Hans J. Eysenck, *Know Your Own I.Q.* Feenstra adaptó el método de medida sugerido en el libro de Eysenck.

Al parecer, el artículo de junio no consiguió engañar a nadie. Todos quienes prepararon versiones de HIPERCUBO conservaron tanto su cordura como su corporeidad. En lo que podría considerarse como estupefaciente caso de precognición, David Ecklein, de Rumney, New Hampshire, puso a punto el programa varios meses antes de que yo lo describiera. El programa de Ecklein desarrolla todos los efectos que muestra HIPERCUBO, pero en lugar de utilizar seis planos de giro se vale solamente de cuatro. Eric Halsey, de Seattle, Wa-

shington, no se conformó con trastear en HIPERCUBO, sino que prosiguió con otros objetos de dimensión mayor que tres, entre ellos, el politopo en cruz tetrádimensional, el símplice tetrádimensional y un politopo especial, llamado casilla-24.

Finalmente, he de mencionar a Edward B. Becker, de Riverhead, Nueva York, quien ha tenido un “encuentro en la tercera fase” con el hiperdodecaedro [véase la figura 4]. El dodecaedro ordinario es el sólido platónico clásico, de doce caras pentagonales. El hiperdodecaedro de Becker está formado por 120 dodecaedros ordinarios, contruidos a partir de 1200 segmentos rectilíneos. La imagen que aquí se muestra se obtuvo proyectando la monstruosa figura tetrádimensional sobre el espacio tridimensional y desplazando después ligeramente cada uno de los dodecaedros componentes en una dirección especificada. Escribe Becker: “Los planos están limitados por los ejes en su posición desplazada, en contraposición con las posiciones sin desplazamiento. De este modo sustituí cada recta... por una especie de perfil en Y, que sugiere mejor algo de la estructura global, al menos, en lo que a mi percepción tridimensional se refiere.”

El mes pasado Martin Gardner propuso a los lectores el reto de descubrir un árbol de Steiner cuya longitud total fuese menor que 32,095 unidades, y que fuese árbol de conexión de la red de 4×9 . Nadie ha mejorado hasta ahora el resultado logrado por Ronald L. Graham y Fan R. K. Chung, de los Laboratorios AT&T Bell [véase la figura 5]. Su longitud es

$$7[1 + \sqrt{3}] + \frac{[(3(2 + \sqrt{3}) - 2)^2 + 1]^{1/2}}{2} + \frac{[(5(2 + \sqrt{3}) - 2)^2 + 1]^{1/2}}{2},$$

o sea, aproximadamente 32,094656...

Taller y laboratorio

El agua exhibe, al helarse o licuarse, exóticas figuras

Jearl Walker

Mirando de cerca un trozo de hielo se descubren cosas muy curiosas. ¿Por qué está lleno de burbujas y tubos que parecen madrigueras de lombriz? ¿Por qué esos tubos son de diámetro cambiante, con una variación a veces regular? ¿Qué determina la distribución de las burbujas? Cuando un cubito de hielo comienza a fundirse, ¿por qué cruje y suelta aire y agua? Si un cubito se expone a un sol intenso, ¿por qué en su interior se generan burbujas, configuraciones hexagonales y otras en helechos? Las respuestas a estas preguntas hay que buscarlas examinando cómo se forman los cristales de hielo cuando el agua se congela.

El agua no se hiela hasta haberse ya enfriado por debajo de su temperatura normal de solidificación de cero grados Celsius. En tal estado, es un líquido sobrenfriado. El proceso de congelación se inicia con un agente nucleador. Tal agente, en la mayoría de los casos, es un cristal de nieve o una impureza del agua. Las moléculas de ésta se adhieren al agente, iniciándose así una estructura cristalina. Luego, conforme se unen más moléculas al cristal, aquél crece hasta encontrarse con otro cristal o con las paredes del recipiente.

Una vez helada la superficie, el proceso de solidificación se traslada al líquido. La congelación requiere extraer calor al agua para enfriarla hasta el punto de solidificación y unir, después, sus átomos a la estructura cristalina. Ese calor atraviesa por conducción la capa de hielo; seguidamente, el aire existente por encima de la capa lo arrastra consigo por conducción o convección.

Si el agua fuese pura (caso ideal), la temperatura del hielo sería la más baja y la interfase entre éste y el agua líquida estaría a la temperatura del punto de congelación del agua. Pero, en la práctica, el agua contiene impurezas que rebajan el punto de congelación en una proporción que depende de la concentración de impurezas. A medida que el agua se transforma en

hielo en la interfase, las impurezas se hunden a causa de la difusión. Como ésta actúa lentamente, la concentración de impurezas tiene un máximo situado un poco por debajo de la interfase.

Esta situación de sobrenfriamiento estructural es lo bastante inestable para que la interfase avance hacia abajo en ramales saledizos y no por planos sucesivos. Cuando el sobrenfriamiento estructural progresa a un ritmo lento, los saledizos son células hexagonales de hielo separadas por agua. Para ritmos de avance más rápidos, esos ramales se asemejan a hojas de helecho. Esas figuras, llamadas dendritas, están constituidas por hojas muy aguzadas que se ramifican en el agua en direcciones regidas por las orientaciones de los cristales de hielo en la interfase. Así, cristales contiguos con orientaciones diferentes producen protuberancias que se extienden en direcciones diferentes. Es posible que ninguno de los salientes sea perpendicular a la interfase.

El sobrenfriamiento estructural favorece la aparición de protuberancias. Imaginemos una de éstas, pequeña, que inicie su desarrollo a partir de algún depósito casual de hielo. Sus ventajas con respecto a cualquier superficie plana de la interfase son varias. Se extiende, para empezar, hacia una zona donde el agua está sobrenfriada al máximo. El aumento de superficie debido a su crecimiento favorece la eliminación de impurezas y calor; de aquí que el agua comience a congelarse sobre el saliente haciendo que se alargue más hacia el seno del líquido.

La geometría básica de un cristal de hielo es una placa hexagonal. El plano de la placa se llama plano basal y el eje geométrico perpendicular a él se conoce como eje *c*. Cuando el cristal inicia su formación, crece mucho más rápido en el plano basal que paralelamente al eje *c*. Si éste es vertical, el cristal crece horizontalmente, a modo de placa. Si es horizontal, el cristal crece adquiriendo la forma de una aguja horizontal o de una placa vertical. Esta última es inestable y puede ro-

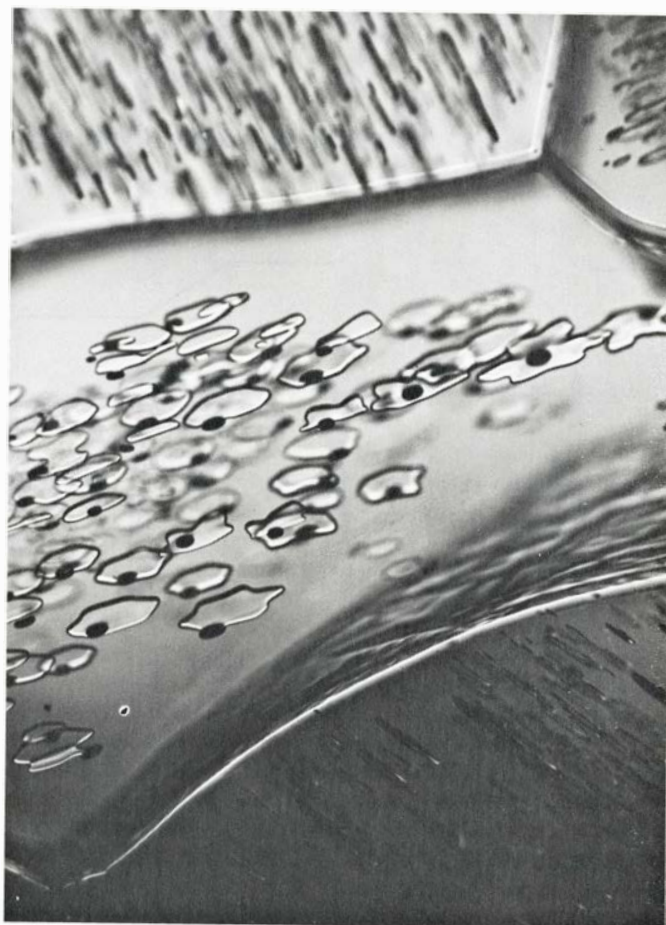
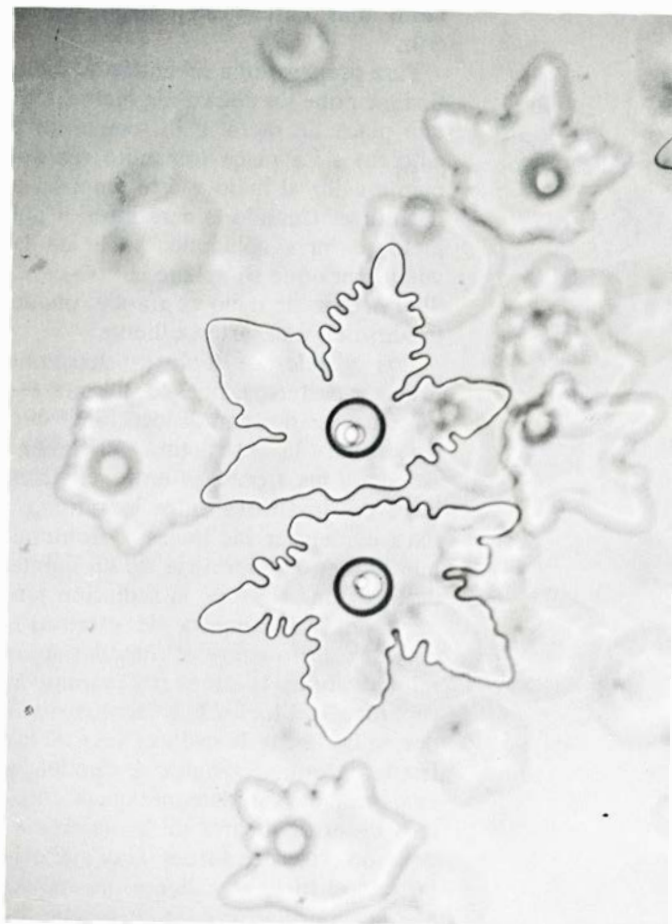
tar para colocarse horizontalmente. Otra posibilidad es que se mantenga en su posición si, antes de rotar, se desarrolla lo suficiente para encontrarse con cristales adyacentes.

A veces, en la superficie del hielo, se hace visible una serie de placas verticales paralelas. Acontece que, como el hielo es más liviano que el agua líquida, las placas, al formarse en la superficie del agua, sobresalen por flotación. Luego, cuando la superficie se hiela, sus bordes quedan dibujando cadenas de crestas paralelas levemente elevadas con respecto al resto de la superficie.

Una muestra de hielo puede contener numerosos cristales iniciados por numerosos agentes nucleadores. Esos cristales pueden distinguirse con ayuda de luz polarizada, siguiendo el procedimiento que describen Robert A. Laudise y Robert L. Barns, de los Laboratorios AT & T Bell. Se construye un soporte de madera [véase la figura 6], de cincuenta o sesenta centímetros de altura, con los extremos abiertos y la parte superior también abierta. El fondo hay que revestirlo con una cartulina blanca que refleje la luz. En la cara superior se coloca una hoja de vidrio. Desde cada extremo abierto se ilumina la cartulina con una luz intensa.

Sobre el cristal se pone un filtro polarizador y, por encima de éste, un trozo de hielo delgado. Luego, encima del hielo, se coloca otro filtro con su eje de polarización perpendicular al del filtro de abajo. (Para evitar que el hielo dañe los filtros, éstos se emparejarán entre platinas de vidrio, sujetándolos por los bordes con cinta adhesiva.) Entonces, los diferentes cristales existentes en el hielo destacarán bajo colores diversos o como zonas grises. Rotando el hielo alrededor del eje vertical de los filtros, los colores cambian. Los cristales cuyo eje *c* esté vertical (según la visual) seguirán mostrando un gris de intensidad invariable. Pero aquellos cristales cuyo eje *c* esté muy desviado de la vertical variarán de intensidad con la rotación y, si son suficientemente delgados, modificarán, a su vez, su tono cromático.

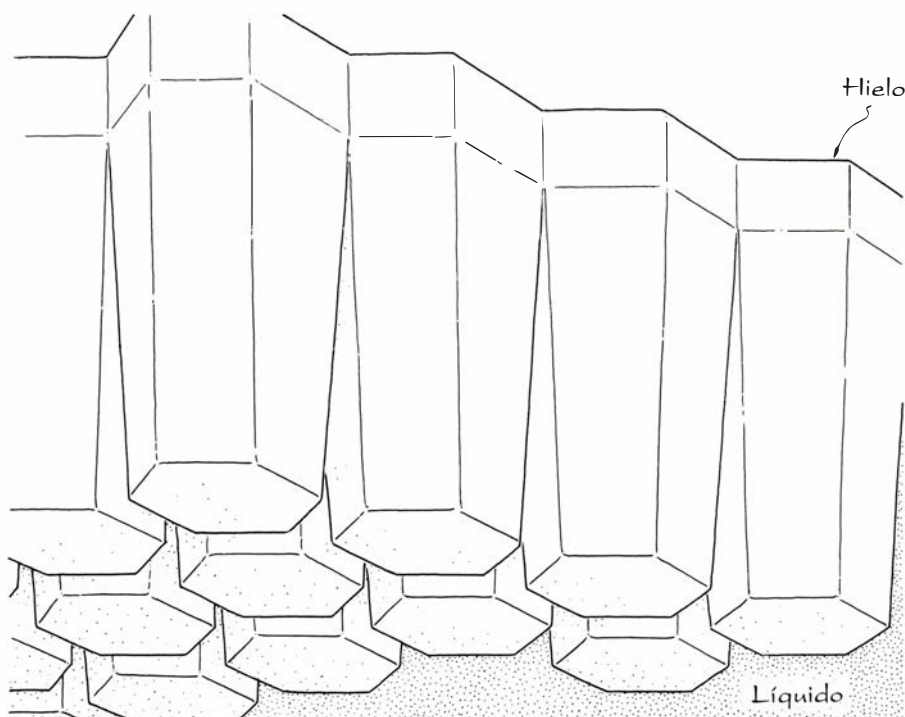
Valiéndonos de una canica de vidrio transparente colocada entre el hielo y el filtro superior, puede detectarse una pequeña desviación entre el eje *c* y la visual. La canica debe tocar el filtro, pero no el hielo. Entonces, al mirar a través del filtro superior y la canica, veremos una cruz oscura que, si el eje *c* está alineado con nuestra visual, aparecerá centrada en la canica; pero cuanto mayor sea la desalineación,



1. Figuras de Tyndall en el hielo



2. Colección de posibles figuras de Tyndall



3. Avance celular de una interfase de congelación

tanto más descentrada aparecerá la cruz.

Para preparar una rebanada de hielo fina, se pone un pedazo de hielo sobre una placa de metal a la temperatura ambiente. La placa transmite rápidamente calor al hielo y éste empieza a derretirse. Cuando la cara inferior del hielo se haya aplanado, se le da la vuelta para que se aplane la otra cara. Si el pedazo de hielo es grande, puede fundirse en una sartén caliente.

Los cristales de hielo no acostumbran ser perfectos, pues los átomos están entrelazados con dislocaciones que desvirtúan la estructura cristalina. Además, las fronteras entre cristales incluyen desajustes entre los átomos. Para evidenciar las líneas y fronteras que hay en la superficie de un cubito de hielo, me sirvo de la radiación térmica de una lámpara de escritorio, cuya luz dirijo sobre él. Pasados unos minutos, retiro la lámpara y examino la superficie del hielo. Los átomos situados en las líneas de dislocación y en las fronteras entre cristales se funden y evaporan más rápidamente que los átomos de otros lugares de la superficie, dejando estrechos surcos. Hay que evitar que el hielo se caliente tan rápido que la superficie se cuarte, lo que dificultaría el seguimiento de las líneas.

Cuando un cubito de hielo se deposita sobre una superficie poco conductora, se caldea gradualmente en el aire ambiente. Cuando el cubito llega al punto de fusión, a cero grados, en su interior se generan tubos a lo largo de las líneas de fractura o de las fronteras entre cristales. A esos tubos yo los llamo agujeros o madrigueras de lombriz. Por ellos viajan burbujas de agua y aire desde el interior del cubito hacia la superficie, donde el agua se expulsa y el aire gorgotea a través del agua ya fundida. Puede oírse el agua y el aire salir por los agujeros de lombriz, especialmente si el cubito está en una placa.

He examinado esa actividad poniendo un cubito de hielo sobre una plataforma de observación similar a la construida por Laudise y Barns. Se apoya una hoja de vidrio, por un lado, en un libro y, por el otro, en una fuente de horno. El vidrio se inclina levemente hacia ésta, para que el agua de fusión se recoja en la misma. El cubito no resbala hacia abajo porque se hace descansar contra varias gotas de cola adheridas al vidrio. La luz de la lámpara se refleja en un papel blanco colocado bajo el vidrio y atraviesa el hielo.

Dentro de cada agujero de lombriz,

las burbujas de aire relucen y contrastan fuertemente con el hielo. Las zonas con agua ofrecen, sin embargo, un contraste exiguo. Al parecer, la presión reinante en el turbido centro del cubito empuja el agua y el aire a lo largo de los agujeros. A medida que el diámetro de éstos va creciendo conforme se licúa el hielo de sus paredes, el tren de burbujas de aire y agua se desplaza por ellos más lentamente.

Los cubitos de hielo que obtuve con agua del grifo contenían muchas burbujas pequeñas y tubos llenos de aire. Lo que ocurre es que, a medida que el hielo avanza hacia dentro, desde las seis caras del cubito, el aire se ve obligado a salir de la solución y se congrega en burbujas. Cuando una de ellas se forma en el fondo del cubito, se libera y flota hasta la capa superior de hielo. Allí, la interfase de congelación puede progresar a su alrededor, dejándola casi esférica. Pero puede también ocurrir que la burbuja recoja aire conforme avanza la interfase. Así nace un tubo, que discurre paralelo a la dirección de avance y, por tanto, en general, hacia el centro del cubito. Finalmente el tubo acaba cuando la interfase logra sobrepasarlo, cerrándole la aportación de aire procedente del líquido remanente.

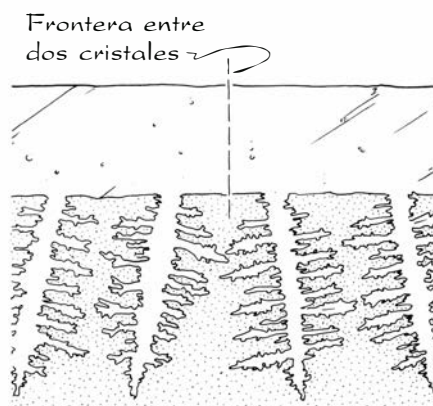
El desarrollo de un tubo depende de dos factores en pugna: el ritmo al que avanza la interfase y el ritmo al que el aire disuelto se difunde en el espacio ocupado por el tubo y se une al aire contenido en él. El avance de la interfase depende de la rapidez con que se conduce el calor procedente de la interfase, a través del hielo, hacia el espacio exterior. Conforme la interfase se adentra más en el cubito, el hielo que debe atravesar el calor se va haciendo más grueso y, por tanto, la velocidad de conducción decrece. Además, a medida que disminuye el volumen de agua contenida en el cubito, puede aumentar la difusión de aire a la burbuja del interior de un tubo. Estos cambios permiten a la mayoría de los tubos ensancharse hacia el interior del cubito. En los tramos más estrechos de los extremos se advierten pequeños retorcimientos, debidos, quizás, a la interfase, que no se desplaza a un ritmo uniforme.

El diámetro de muchos tubos varía periódicamente. Esta variación es resultado probable de variaciones en el avance de la interfase, consecuencia, a su vez, del ciclo de enfriamiento del congelador. En mi caso, el aire del congelador varía de temperatura entre -6 y -14 grados C. Entonces, cuando el

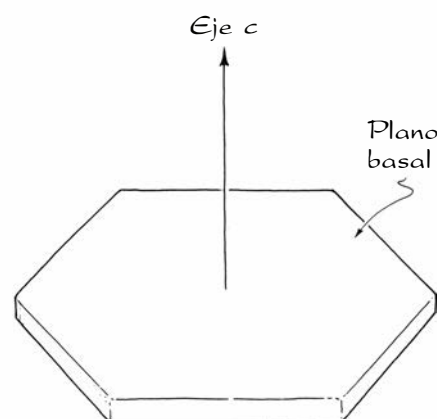
aire se encuentra en la etapa más cálida, la conducción del calor a través del hielo es lenta y lo mismo el avance de la interfase. La difusión de aire al tubo dilata el diámetro de la burbuja situada en su boca y, con ello, aumenta el diámetro del tubo. Con el aire más frío, la conducción del calor procede rápida y la interfase avanza a mayor velocidad que la de difusión del aire a la burbuja de la boca del tubo; éste se estrecha más. La periodicidad de tales variaciones en el diámetro del tubo se complica por muchos otros factores, entre los que se cuenta el espesor cada vez mayor del hielo a través del cual debe conducirse el calor.

Los tubos que se forman progresando desde el fondo son verticales, estrechos y de diámetro poco variable. Esta uniformidad obedece a dos factores. La conducción de calor a través de la capa de hielo del fondo es habitualmente insensible a las variaciones de temperatura del aire del congelador. Además, las burbujas que se forman en las bocas de esos tubos se desprenden cuando alcanzan cierto tamaño, dejando todos los tubos con el mismo tamaño, más o menos.

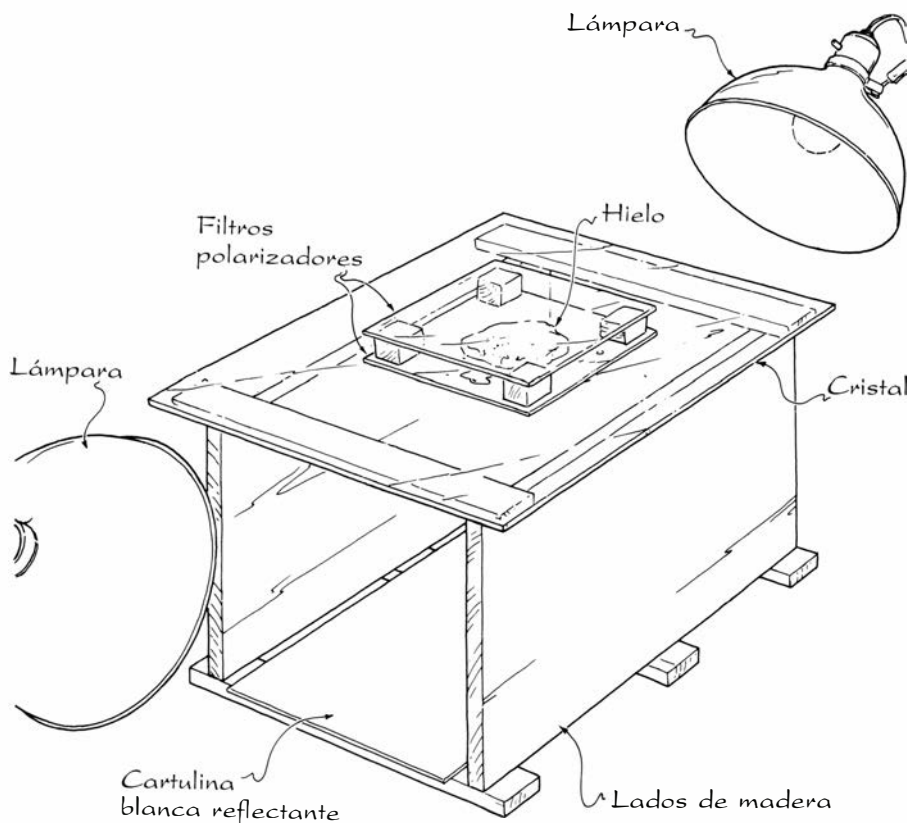
Cuando el proceso de congelación llega al centro del cubito, la formación de burbujas de aire y la captura de impurezas en el hielo se generalizan. Así, el centro es blanco y turbio, en vez de



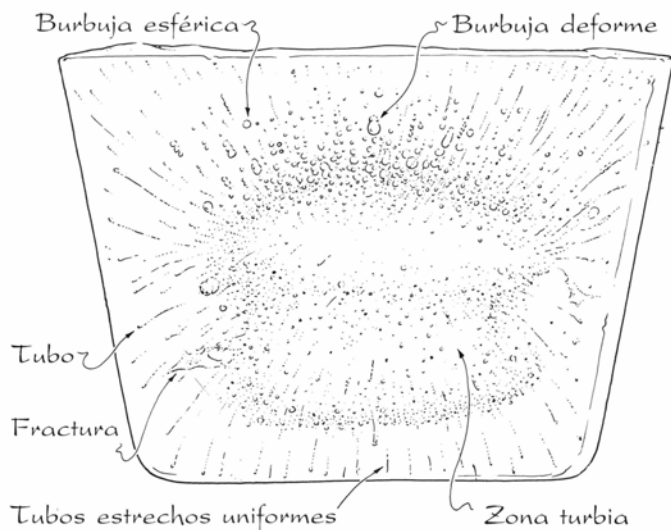
4. Crecimiento dendrítico de dos cristales



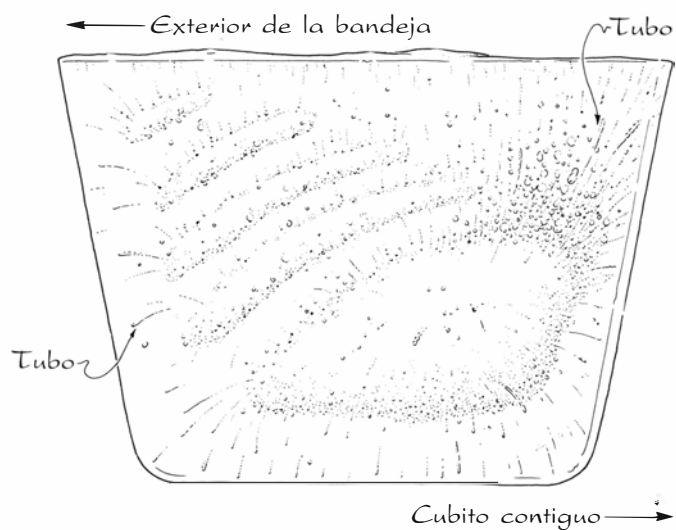
5. Geometría de un cristal de hielo



6. Plataforma de observación de Robert A. Laudise y Robert L. Barns



7. Bolsas de aire en un cubo de hielo



8. Capas turbias en el hielo

transparente, porque las burbujas e impurezas dispersan toda la luz que llega. Esa zona es generalmente más delgada que ancha porque el proceso de congelación progresa más rápido por la superficie superior que por los lados o el fondo del cubito.

Es frecuente que la presión en las burbujas y la dilatación del agua, al solidificarse, fracturen el cubito. Por ello, para conseguir cubitos casi exentos de burbujas y reducir la posibilidad de que se fracturen, se recomienda hacerlos de agua destilada que se haya hecho hervir al menos durante cinco minutos, a fin de eliminar el aire disuelto.

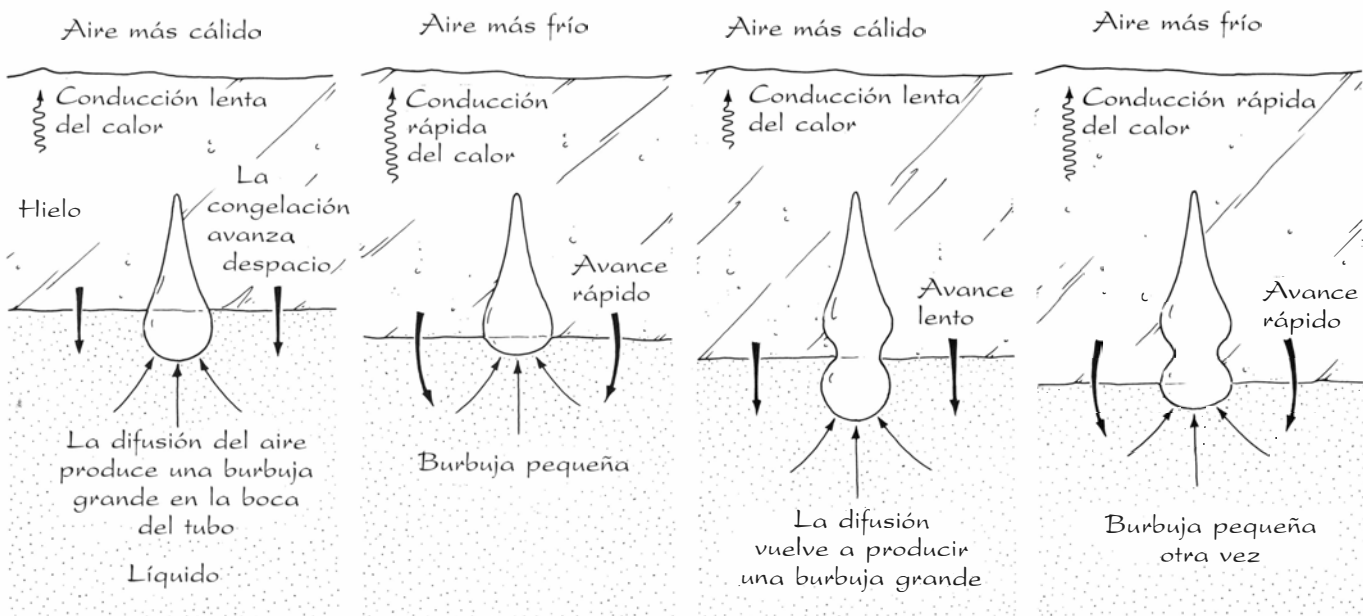
En mi bandeja de cubitos de hielo, los de cada extremo tienen cuatro o cinco capas turbias inclinadas, con respecto a la horizontal, hacia una esquina de la bandeja. Estas capas se deben,

probablemente, al ciclo de enfriamiento del congelador. Cuando la temperatura del aire de éste es baja, la rápida conducción del calor a través del hielo permite que la interfase de congelación avance rápidamente, líquido abajo, desde la parte superior y los lados en contacto con la bandeja. Este veloz avance aprisiona aire e impurezas antes de que puedan escapar al líquido. Luego, la parte más cálida del ciclo frena el avance del hielo, permite que las burbujas e impurezas escapen y origina un hielo más traslúcido. La orientación de las burbujas de aire en la proximidad de las capas turbias revela el avance del hielo desde varias direcciones.

Si el hielo se ilumina con luz solar fuerte, puede derretirse por dentro, pese a que su superficie permanezca

sólida. La primera noticia acerca de la fusión interna la dio, en 1858, John Tyndall, físico británico a quien se le recuerda por sus estudios de acústica. Según su razonamiento, la radiación térmica de la luz solar funde ciertos puntos del seno del hielo. Y como éste disminuye de volumen al licuarse, se forma en el líquido una pequeña burbuja de vapor de agua. Estas burbujas dispersan la luz y hacen destellar el hielo con puntos brillantes.

Tyndall descubrió que los diminutos puntos de fusión interna adquirían múltiples formas. De éstas, la más corriente es la ovalada. Menos frecuentes son los puntos que exhiben la simetría hexagonal de un copo de nieve. Otros se asemejan a hojas de helecho y se describen atendiendo a lo que es una hoja y el tallo al que está unida. Tyn-



9. Variación del diámetro de un tubo en el hielo fundente

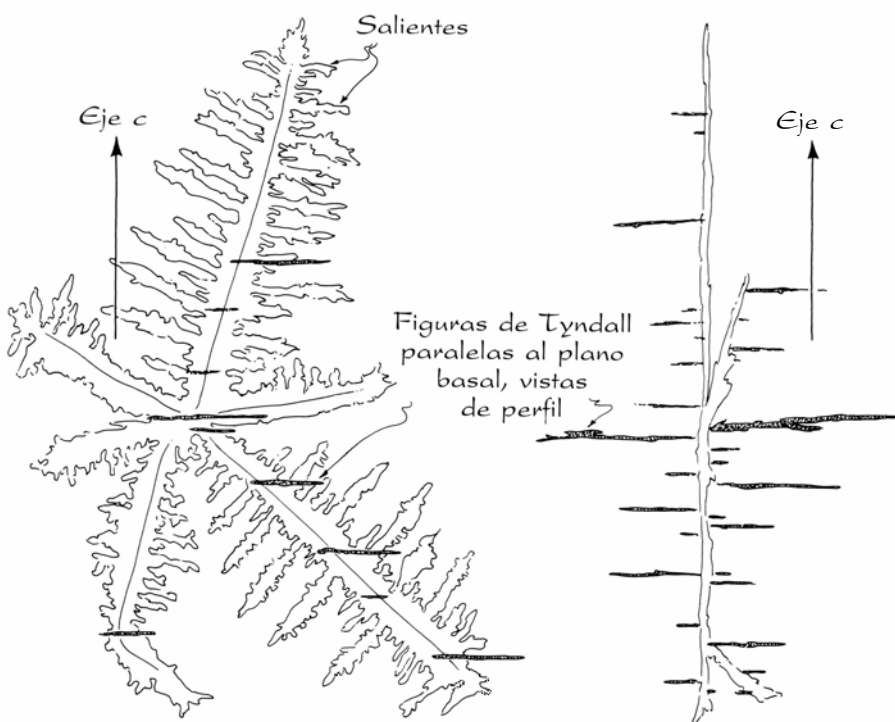
dall llamó a esos puntos flores líquidas. Hoy, en su honor, constituyen las figuras de Tyndall.

El británico encontró sus figuras por debajo mismo de la superficie de un estanque congelado e iluminado por una intensa luz solar. Las mayores, de milímetros de largo, las pudo ver sin dificultad; para las menores, necesitó una lupa. Corrían paralelas a la superficie del estanque. Sugirió Tyndall que esa orientación venía favorecida por el hecho de que la interfase de congelación entre el agua y el hielo estaba siempre aproximadamente horizontal.

En 1964, Keiji Higuchi, de la Universidad de Hokkaido, propuso un criterio diferente. En su opinión, las figuras de Tyndall simétricas yacen en planos paralelos al plano basal del cristal de hielo en el que se forman, mientras que las de helecho yacen en planos perpendiculares al plano basal, es decir, paralelos al eje c del cristal de hielo. De aquí que la orientación de las figuras con respecto a la superficie del estanque dependa de la orientación del cristal cuando éste se hiela. Higuchi dio cuenta asimismo de que las hojas de los helechos forman un ángulo de unos 45 grados con el eje c . En algunas de las figuras, las hojas son perpendiculares al tallo; en otras, el ángulo es menor. Se desconoce todavía qué determina ese ángulo.

Es probable que las figuras de Tyndall se generen allá donde el hielo contenga aire o impurezas. La falta de uniformidad de tales puntos aumenta la absorción de la radiación térmica, ocasionando la fusión. Pero no se conoce bien el mecanismo que origina la formación de las figuras de Tyndall. Charles A. y Nancy C. Knight, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, de Boulder, Colorado, conjeturan que el proceso de caldeo empieza generando vapor. Después, el hielo que circunda la cavidad del vapor se licúa, a la vez que la figura de Tyndall evoluciona. Las figuras de helecho insinúan que el proceso de fusión pueda ser el inverso del proceso normal de congelación dendrítica.

Los Knight descubrieron, asimismo, un tipo de figuras de Tyndall carentes de burbuja de vapor. En los lugares donde el hielo queda comprimido en lados opuestos de un plano a lo largo del cual el hielo se ha fracturado, el caldeo provoca una fusión que forma unas lentes de agua delgadas y curvas. Cada una de estas lentes yace aproximadamente paralela al plano basal del cristal. Cuando aparece una lente, las interfases de fusión se alejan del plano de fractura en sentidos contrarios. En vir-



10. Helechos de Tyndall observados por Keiji Higuchi

tud de la compresión, las moléculas de agua de las interfases se desplazan ligeramente hacia el plano. Así pues, no hay un cambio neto de volumen que requiera la formación de una burbuja.

Los Knight cultivaron cristales de hielo congelando agua destilada en un balde. Seguidamente, a temperatura ambiente normal, expusieron al aire, durante cinco minutos, placas rectangulares de varios centímetros de lado para que se calentaran hasta el punto de fusión. Suspendieron luego cada placa delante de una lámpara halógena de 1000 watt, parcialmente rodeada de un reflector. La radiación térmica de la lámpara produjo las figuras de Tyndall.

Cuando irradiaban una placa con la máxima intensidad, en toda la masa de hielo aparecía una multitud de diminutas figuras de Tyndall, que crecían a razón de unos dos centímetros por segundo. Cada individuo de esa multitud era una bolsa de agua hexagonal acompañada de una burbuja de vapor. Aquellas bolsas no estaban conectadas; entonces, ¿por qué surgían juntas? Los Knight sugirieron que se generaban mecánicamente a consecuencia de los esfuerzos y deformaciones que acompañaban a la fusión.

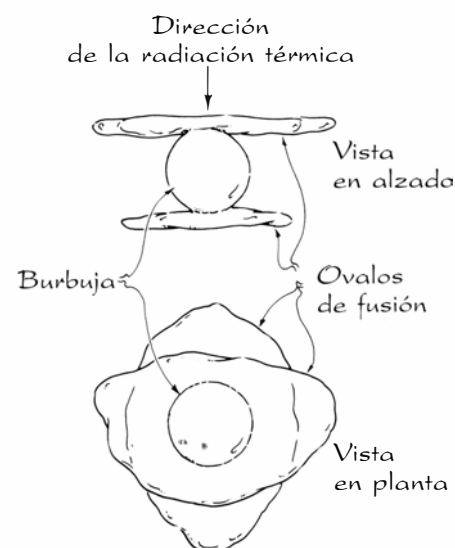
Shinji Mae, de la Universidad japonesa de Nagoya, estudió la producción de figuras de Tyndall más convencionales en los límites de un grano de hielo que cultivaba partiendo de agua destilada, desgaseada y desionizada. Antes de examinar cada muestra, la dejaba calentarse en el aire ambiente hasta

que veía formarse vetas de agua a lo largo de las fronteras entre cristales contiguos. En ese momento, el hielo se encontraba en su punto de fusión. Seguidamente enfocaba la luz de una pequeña lámpara sobre un zona de unos cuantos milímetros de anchura en el interior del hielo.

Entre el conjunto de figuras de Tyndall producidas por la lámpara, había una que parecía una flor de 12 pétalos. De qué modo puede surgir una simetría dodecagonal de la simetría básicamente hexagonal propia de los cristales de hielo es algo que no se sabe aún. Mae observó asimismo figuras de helecho, similares a las que Higuchi descubrió en planos perpendiculares al plano basal de los cristales de hielo.

Me he dedicado a estudiar las figuras de Tyndall en cubitos de hielo formados en mi congelador, tras hervir el agua para reducir la cantidad de aire disuelto. Antes de examinarlos, dejaba que se calentaran al aire ambiente hasta el punto de fusión. Al principio, la superficie se empañaba con gotas de condensación, pero al cabo de dos o tres minutos se cubría enteramente de agua de fusión que devolvía su transparencia a la superficie. Para entonces, por los agujeros de lombriz salía ya agua y aire. Colocando el hielo en mi plataforma de observación, lo examinaba con una lente de joyero.

En mis primeros experimentos, calenté los cubitos durante algunos minutos con la lámpara de mi escritorio. La fusión interna produjo óvalos, pero



11. Fusión en torno a burbujas congeladas en hielo

también había helechos y una magnífica figura hexagonal. En la sospecha de que el calor de la lámpara no bastaba, recurrí a un calefactor de cuarzo de 1500 watt y sostuve un cubito delante, envolviéndome la mano en una tela gruesa para protegerla del calor. Pasados unos minutos, busqué en el hielo figuras de Tyndall.

El premio fue inmediato. El hielo fundente albergaba estrellas hexagonales y helechos, así como figuras mal definidas de perímetros puntiagudos. Las figuras las encontré enfocando primero una burbuja y ajustando, luego, cuidadosamente, la altura de la lente hasta enfocar la zona de fusión correspondiente. Al propio tiempo, ajusté la iluminación o la posición del cubo en el cristal para mejorar el contraste de la zona de fusión.

Las figuras eran muy delgadas. Cuando las observé de perfil, desde otro ángulo, descubrí que se trataba de finas lentes de agua. Las más llamativas solían ser efímeras y se transformaban en óvalos delgados. Quizás interrumpiese yo su crecimiento al trasladar el hielo a la plataforma de observación.

El foco calorífico fundía también el hielo en torno a las burbujas de aire ya congeladas en el hielo. Al mirar el cubito desde arriba, vi cada burbuja rodeada de un óvalo de fusión. En muchas, se veían dos óvalos sobrepuestos, uno de ellos en la parte superior de la burbuja y el otro, en la inferior, tal como pude comprobar al contemplarlos desde otro ángulo.

Hay más cosas que averiguar observando el hielo. Recibiré gustoso toda noticia relativa a cualquier descubrimiento que explique mejor la formación de burbujas y tubos.

Libros

Tamaño y vida, socioestadística, neurohistología y ciencia moderna

Ramón Margalef, Carlos M. Cuadras, Agustín Albarracín y E. Rada

TAMAÑO Y VIDA, por Thomas A. McMahon y John Tyler Bonner. Biblioteca "Scientific American". Prensa Científica; Barcelona, 1986. Estos últimos años han aparecido varios libros, de nivel y carácter diverso, sobre el tema común de las relaciones que, de una manera fatal y más o menos satisfactoriamente explicable, guardan muchas propiedades y características biológicas de los organismos con su tamaño. El presente libro se halla en la misma línea, en un nivel de alta divulgación, y resulta de la feliz colaboración entre un ingeniero (McMahon) y un biólogo (Bonner), quienes ya en otros libros habían expuesto sus inquietudes y el resultado de su reflexiones en torno al tema del tamaño y de la organización. Creo que debemos congratularnos que sea precisamente *este* libro el que se haga asequible en una versión española.

Los cuentos fantásticos en los que se supone a los seres mucho mayores o mucho menores de lo que son en la vida real, con los problemas que estos cambios de escala llevarían consigo, proporcionan una introducción adecuada al tema. En una aproximación más científica encontramos la preocupación de Galileo acerca de la necesidad de huesos columnares suficientemente recios en grandes animales, y de la sección mínima que han de tener los troncos de los árboles para resistir las consecuencias de un determinado peso de la copa y del esfuerzo que soporta contra el viento. Y, junto con ella, la aproximación idealista de d'Arcy Thompson que contempla la correspondencia entre las distintas formas y la transformabilidad de unas en otras, punto de vista que, como otras –y sirva de ejemplo la aplicación de la teoría de las catástrofes–, suele parecer excesivamente idealista al biólogo medio, o, por lo menos al que escribe este comentario.

La masa de los seres vivos, de los individuos, se extiende a lo largo de una

escala que abarca 21 potencias de diez. Se comenta adecuadamente esta amplia escala, sin hacer notar expresamente que el hombre, dentro de la misma, no ocupa una posición equidistante de los extremos, sino más bien tirando hacia arriba. Aunque no se escribe mucho sobre ello, el paso de pequeño a grande y el de grande a pequeño no se dan con igual facilidad en el curso de la evolución, y parece que los dados están cargados a favor de los grandes, lo cual no apoya precisamente la neutralidad e indeterminación que se suele asociar con los procesos elementales de la sucesión. Dentro de la escala de tamaños, el hombre parece que ocupa una posición favorable, lo que nos permitiría hablar –también en este contexto– de un principio antrópico, como se pone de manifiesto con la comparación con otros animales sociales, como pueden ser las hormigas. Claro que si fuéramos tan pequeños como ellas tendríamos menor probabilidad de sufrir daño al caer de grandes alturas, pero no podríamos usar fuego, ni herramientas (no es fácil imaginar a una hormiga haciendo algo útil con un martillo a su medida) ni siquiera lavarnos la cara con agua. Dicen que tampoco podría producir literatura, pero los autores no se extienden y ni siquiera mencionan la principal razón para ello, consistente en que la capacidad de una computadora –y de un cerebro– crece como una potencia de su tamaño.

Se introducen las relaciones de tipo logarítmico o alométrico, con referencia a la generación de calor en homeotermos y su difusión a través de la superficie del cuerpo (reglas de Rameaux, Sarrus, Bergmann), todo ello en relación con la forma y el tamaño. Otros problemas que conciernen a la naturaleza de los fluidos (viscosidad, propagación del sonido) se relacionan también con el tamaño y afectan a la vida individual de un organismo que crece, y, de forma diferencial, a las dis-

tintas especies de un grupo con velocidades y límites diferentes del crecimiento. Un ejemplo de la relación funcional se pone de manifiesto en la ley de Kleiber que expresa la respiración en función de la biomasa. Como en cualquier familia de instrumentos musicales, los individuos mayores producen sonidos más bajos, y aquí se encuentra el fundamento de una selección sexual si, como ocurre en muchas especies animales, las hembras sienten una especial debilidad por los galanes de registro más bajo. Se ilustra bien la extensión de estas ideas generales a artefactos (clavos, aviones), mecanismos complicados (motores de combustión interna, desde propulsores de aviones de juguete hasta grandes motores marinos de 100 toneladas), actividades (pesos levantados por practicantes de la halterofilia) y situaciones mixtas y más complicadas como son las relaciones entre masa, longitud, número de remeros y velocidades alcanzadas en botes de remos.

Hay un buen capítulo (3), sustancialmente de física, con una introducción al análisis dimensional y una explicación del objetivo que tiene el buscar relaciones adimensionales, principalmente en problemas con fluidos (números de Reynolds, de Froude...). Se comentan la intención y los resultados del estudio de modelos en túneles aerodinámicos e hidrodinámicos, y numerosos problemas asimilables, desde el grifo que gotea hasta la bomba atómica, y desde el movimiento de submarinos hasta las notas que producen los instrumentos musicales de distintas características y tamaños.

El volver ahora a la biología da ocasión de comparar muchas propiedades de los organismos, y aún su tempo fisiológico, con las dimensiones. Algunas de las propiedades de expresión compleja permiten introducir números adimensionales. Característicamente se trata de funciones fisiológicas, como la circulación de la sangre, el trabajo muscular y la duración de procesos vitales. En todos los casos se dan ejemplos, generalmente con una presentación gráfica que no engaña acerca del grado de aproximación conseguido con la descripción abreviada. Aunque la interpretación presentada es siempre razonable en sus líneas generales, no se oculta la real complejidad que pueden tener algunos de los problemas. Esto debe hacerse constar ahora que –dentro de la actualidad del tema– se han publicado algunos artículos muy críticos de las pretensiones exageradas de

algunas de las fórmulas simplificadas. Algunos temas ya introducidos se vuelven a tratar con más base, como la semejanza "elástica", el consumo de oxígeno, el tempo fisiológico. Se prefieren exponentes relativamente sencillos en las expresiones alométricas y no se introduce una concepción fractal generalizada. Se acepta que, en general, dentro de una especie pueden predominar relaciones de tipo isométrico, mientras que las relaciones alométricas son más obvias al comparar especies diferentes.

Los dos capítulos siguientes (5,6) se titulan, respectivamente, "Ser grande" y "Ser pequeño", y, junto a problemas específicos de un tamaño determinado, distribuyen de manera poco lógica otros problemas comunes o generales, como el vuelo. Se trata de estimar los condicionamientos que impone el ser de grandes dimensiones (elefante, secoya), o bien más pequeños (ratón, organismos del plancton). Los organismos grandes pueden acumular más reservas y pueden moverse más en el caso de los animales y, si son plantas, disponen de un sistema de transporte más extenso; pero son incapaces de multiplicarse con la rapidez suficiente para seguir las fluctuaciones importantes en las características del entorno. Los animales grandes no pueden trepar a los árboles y se lastiman si caen. El estudio de las propiedades de elasticidad de la madera con las relaciones métricas de los árboles y la curvatura máxima del tronco resulta fascinante —uno no puede cansarse de contemplar un árbol, lástima que al paso que vamos pronto no nos quedarán de ellos más que las cenizas—. Relaciones del mismo tipo deben extenderse, por supuesto, a las ramas y también aquí se pierde la ocasión de introducir una geometría fractal generalizada.

El estudio de la locomoción es importante. Las características mecánicas de la máquina, las restricciones en la contracción de los músculos y las irregularidades del suelo permiten encontrar soluciones generalmente válidas dentro de un rango bastante amplio de dimensiones, incluyendo la transición del trote al galope, el movimiento en terreno inclinado y la existencia de adaptaciones especiales como en el canguro, que se compara con un saltador de muelle. El vuelo permite encontrar regularidades entre la frecuencia del aleteo, la longitud del ala, o la carga por unidad de superficie de sustentación y el peso total, que, en parte, son válidas desde el colibrí hasta los

grandes pterosaurios de más de 10 metros de envergadura, y se pueden extender incluso, en lo que son aplicables, hasta los grandes aviones. A medida que aumenta el tamaño, la inversión de la energía en los esfuerzos de sustentación y de fricción varía en sentidos opuestos, y donde la suma de las dos corresponde a una potencia mínima (seis watt en un ave de 400 gramos, como una paloma) la velocidad es de 42 kilómetros por hora. El vuelo de las aves presenta otras modalidades, cuando es más bien revoloteo que vuelo y, dentro de tamaños menores, el vuelo de los insectos se presta a formular otras regularidades comparables y maravillarse ante ellas.

La natación de los animales grandes insta la consideración de las condiciones hidrodinámicas, la influencia de los perfiles, y para velocidades grandes, en el caso de cetáceos, examinar el significado de la flexibilidad de la piel de estos animales, que parece menos importante de lo que se sospechara. En animales pequeños, a bajos números de Reynolds, la viscosidad del agua es decisiva. Los efectos de la viscosidad se manifiestan también al pretender salir del agua y en la particular influencia de la superficie libre del líquido. Se examina también la natación de organismos del plancton, de ciliados y la que depende de los cilios rotativos de las bacterias. Se dedica un corto espacio al tema interesantísimo de las superficies adherentes que tienen diversos animales, desde las moscas hasta las salamandras, y que les permiten sujetarse a paredes rugosas verticales y trepar sobre ellas.

El capítulo final (7) trata de la ecología del tamaño, preguntándose por la razón de las regularidades que existen en los ecosistemas, entre las que la más notoria es, por supuesto, que los depredadores son menos numerosos y más corpulentos que sus presas, tal como se simboliza en las "pirámides" de Elton, y en el dicho de que el pez grande se come al chico. Ciertamente la evolución ha seguido esta ruta, pero todos han tendido a aumentar de tamaño, y muchas presas que lo han conseguido —grandes herbívoros— escapan a sus antiguos depredadores.

Pero existen otras relaciones. Si Hutchinson y MacArthur señalaron que el número de especies es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud individual, y Damuth sugirió que el número de individuos es también inversamente proporcional a su abundancia, aunque estas relaciones sean aproxi-

madas, se puede anticipar encontrar regularidades notables en la distribución de la biomasa total en clases definidas por los límites de tamaño, e incluso en las relaciones con la diversidad. Otro tema de discusión trata de las diferencias de tamaño que deben existir entre especies afines para que puedan coexistir sin que la competencia acabe con una de ellas. Se han dado relaciones longitudinales que varían entre 1,3 y 1,5, habiéndose llamado la atención (Hutchinson, Diamond) que las mismas relaciones métricas se observan entre las dimensiones lineales de los modelos seriados de aquellos objetos que se fabrican en diferentes dimensiones, como triciclos o sillitas de niños.

El tamaño se asocia con las llamadas estrategias evolutivas, dentro del eje r - K , siendo por supuesto r los organismos pequeños y K los mayores. Pero esta correspondencia debe acogerse con escepticismo y tratarse con precaución, pues sólo es válida dentro de cada grupo, y es difícil establecer comparaciones generalizables. Las diferencias de tamaños entre individuos de diferente sexo, cuando existen, la duración de la vida individual y el tamaño del cerebro hacen esperar la exploración de relaciones hasta ahora no estudiadas y aguardar que nuevas generalizaciones se propongan en el futuro. La vida manipula el tamaño, pero el tamaño impone restricciones muy importantes a las condiciones aceptables de vida. Con los autores, podemos concluir este comentario expresando la opinión de que, entre las facultades especiales de la vida, tan sólo la imaginación carece de límites.

El libro está muy bien presentado, con ilustraciones adecuadas y esquemas muy claros. La traducción y revisión del texto resulta a veces poco ágil, pero raramente es confusa. Hay algunos errores (libélula fósil de 750 cm, pág. 73) y palabras o expresiones que, por lo menos, resultan chocantes, como mosca hada, saltamontes del rododendro, milímetros de oxígeno, tamaños en peniques, etc., pero que el lector salva fácilmente. (R.M.)

SOCIOESTADÍSTICA. INTRODUCCIÓN A LA ESTADÍSTICA EN SOCIOLOGÍA, por Manuel García Ferrando. Alianza; Madrid, 1985. La ciencia estadística, cuyo uso en las ciencias experimentales como la biología y la agricultura arranca de muy antiguo, se ha venido haciendo imprescindible en otras ciencias: medicina, psicología, geología, economía, etc. La necesidad de cuan-

tificación, por lo que representa de objetividad, precisión e incluso belleza, le ha llegado también a la sociología. La primera forma de cuantificación de una ciencia no exacta se consigue a través de la estadística. Este es el objetivo principal del libro escrito por el profesor García Ferrando.

En un lenguaje claro, al menos en una primera aproximación, se exponen los principales conceptos estadísticos a lo largo de 15 capítulos, en un orden lógico bien estructurado. Como dice el autor: "He tratado de presentar, de la forma más clara posible y a un nivel introductorio, unos conceptos, unos métodos y unas técnicas de trabajo que son absolutamente necesarios para el trabajo científico en sociología. Y todo ello utilizando una presentación verbal de los conceptos, rehuyendo, en la medida de lo posible, las derivaciones matemáticas, mediante la utilización de un lenguaje científico claro, inteligible y actualizado del idioma castellano". Estas frases de presentación definen tanto las ventajas como los inconvenientes del libro. ¿Ventajas? Puede ser consultado por cualquier lector con muy escasos conocimientos matemáticos. ¿Inconvenientes? Los conceptos que en esta obra se exponen no son tan claros como el autor pretende. *Socioestadística* responde a la mentalidad del sociólogo más que a la del estadístico.

La obra se inicia con un capítulo sobre la importancia de la estadística como instrumento matemático para el análisis de datos sociológicos. Tras una correcta introducción histórica, describe la relación entre estadística y sociología, resaltando que es imprescindible su utilización para interpretar los enormes bancos de datos sociales que existen actualmente.

Los capítulos 2 y 3 se destinan a explicar las principales técnicas descriptivas (histogramas, medidas de tendencia central, dispersión y forma, etc.) en un lenguaje ameno, ilustrado con numerosos ejemplos que atraen la atención del lector. Quizá la exposición resulte elemental en algunos puntos. ¿Es necesario explicar algo tan básico como la representación cartesiana? Cualquiera que lea la prensa diaria o algún semanario está acostumbrado a interpretar un gráfico de sectores y otras formas elementales de representación gráfica de datos. Tampoco se debe introducir la distribución normal en estadística descriptiva antes de hablar de la probabilidad o de la distribución de una variable aleatoria, tema que el autor elude prefiriendo la noción ambi-

gua (si no aberrante) de distribución de "frecuencia infinita".

Los conceptos con mayor entidad estadística aparecen en el capítulo 4. Se introducen ideas básicas sobre estadística inferencial, cálculo de probabilidades, combinatoria y muestreo, logrando que ninguno de estos conceptos quede demasiado claro. Por ejemplo, la noción de probabilidad no se distingue de la noción empírica de frecuencia, el parámetro "media poblacional" no es una media aritmética sobre la población, etc.

El capítulo 5 contiene una buena introducción didáctica al uso correcto de las pruebas de decisión en estadística aplicadas a la investigación sociológica, aunque aparece una pequeña confusión entre el teorema enunciado como teorema del límite central y la ley de los grandes números. En el capítulo 7 se describen algunas pruebas estadísticas relativas a una sola muestra (*ji-cuadrado*, *t* de Student). Se presenta una noción de independencia estocástica y se incluyen numerosos coeficientes de asociación. Los capítulos 8 y 9 ofrecen una estructura similar, y abordan la asociación entre variables nominales, ordinales y de intervalo. Todos los coeficientes al uso son debidamente explicados. El capítulo 10 trata de las diversas pruebas sobre la comparación de dos muestras, con alguna que no obedece al título del capítulo (prueba para el coeficiente *rho* de Spearman).

Aunque los capítulos 6 y 10 están bien presentados, como los conceptos de probabilidad, media poblacional y distribución fueron expuestos anteriormente con escaso rigor, el significado de las pruebas estadísticas puede parecer confuso. En el capítulo 11 se introduce el análisis de la varianza en la línea de los otros capítulos: nivel elemental, ejemplos interesantes, exposición poco rigurosa pero fluida. Solamente se trata el caso de un solo factor o causa de variabilidad, pues se alega que los casos con más factores pueden sustituirse con ventaja por los métodos de análisis multivariable. Esta afirmación no es cierta. Tampoco es muy acertado el término "análisis de la varianza" para referirse a la prueba de Kruskal-Wallis o a la prueba de Friedman, pensadas ambas para abordar cualquier tipo de variable, en particular las que carecen de varianza.

Los capítulos finales se ocupan de las técnicas estadísticas en las que intervienen tres o más variables. En primer lugar se establecen los modelos de elaboración que tienen mayor aplicación

en la investigación psicológica empírica. En un lenguaje asequible se exponen las relaciones de estructura lineal entre tres variables, estudiando especialmente las formas de secuencia causal. Más adelante, tras la presentación de algunos aspectos sobre regresión y correlación múltiple, nos encontramos con una breve e interesante incursión en el análisis de camino, que constituye una de las técnicas más potentes en la investigación sociológica, pues los diagramas de camino (en los que pueden intervenir variables observables, indicadores, factores y otros) permiten establecer relaciones de causalidad entre múltiples variables sociales.

Los capítulos que versan sobre el análisis multivariable son los que presentan mayores problemas de comprensión. El autor, al pretender explicar demasiadas técnicas en tan corto espacio, no consigue ofrecer una síntesis equilibrada. En primer lugar, el término "multivariable" debería ser sustituido por "multivariante", más general, pues algunas técnicas multivariantes estudian y representan la covariabilidad multidimensional sin utilizar variables observables en sentido estricto. Así, no es del todo cierta la afirmación de que "las técnicas de análisis multivariable parten siempre de una matriz general de datos" (definida a través de variables). Por otra parte, las técnicas se describen con un apoyo excesivo (y a veces demasiado textual) en las referencias bibliográficas, incluso con alguna confusión. Por ejemplo, el llamado análisis de Eckart y Young, que consiste en aproximar una matriz por otra de rango inferior (fundamento del análisis de coordenadas principales, el método biplot, etc.), y el análisis de correspondencias (que se aplica para la representación de datos categóricos) no son en modo alguno métodos de análisis factorial. Asimismo, la representación mediante un dendrograma es obvio que no es una forma de representación espacial (¿dónde estarían los ejes?). Lo es sin embargo el "escalamiento multidimensional", que quizás debería denominarse "análisis de proximidades" o "medición por escalas multidimensionales". (C.C.)

CAJAL, por José M.^a López Piñero. Salvat; Barcelona, 1985. UNA CONTRIBUCIÓN A LA CIENCIA HISTOLÓGICA: LA OBRA DE DON PÍO DEL RÍO-HORTEGA, por Pedro Cano Díaz. Instituto Arnau de Vilanova del Consejo Superior de Investigaciones Científi-

cas; Madrid, 1985. Existen temas que, como en el episodio bíblico de las murallas de Jericó, nunca se agotan por más vueltas que en torno a ello se den. A lo sumo, cada vez vamos acercándonos más al núcleo último cuya conquista debe constituir el *desideratum* del investigador. Tal es el caso en el tema de la escuela neurohistológica española y, por supuesto, de sus protagonistas.

Varias son ya las biografías que acerca de Santiago Ramón y Cajal se han publicado estos últimos años. A ellas y a su valoración objetiva alude López Piñero en este nuevo *Cajal*, prologado por Pedro Laín Entralgo. También sobre alguna de ellas, escrita allende los Pirineos, me he ocupado yo mismo en estas páginas de la revista.

Los conocedores del tema saben muy bien el empeño de López Piñero por desmontar la figura “mítica” de don Santiago Ramón y Cajal, ajustándola a la figura “realmente histórica” del máximo cultivador de una disciplina que no creó él de la nada, en hazaña casi taumatúrgica. De ahí que en esta biografía intente ofrecer acercamientos que —son sus propias palabras— restituyan a la sociedad española una imagen objetiva de su más importante investigador contemporáneo.

Utiliza para ello López Piñero la doble vía de la exposición de las vidas sucesivas de Ramón y Cajal, como marco de sus vidas complementarias. Desde la consideración de aquéllas, nos ofrece su trayectoria biográfica, expuesta en ocho grandes períodos: la niñez y la adolescencia, la juventud universitaria, la experiencia ultramarina como médico militar, el opositor a cátedras, los años de Valencia, los decisivos de Barcelona y, en fin, la etapa madrileña, en la que separa los años de “culminación” —1892-1914— de los de “declive” —1914-1934—. De todos estos capítulos, todos ellos escritos con el rigor y la información característicos de cualquier obra del profesor López Piñero, a mi juicio, y como modesto conocedor del tema, el dedicado a la exposición de la etapa valenciana de Cajal es el que aporta mayores novedades y ofrece nuevos datos de la vida y obra del joven catedrático aragonés. Así enmarcada la vida del histólogo, López Piñero va situando en cada una de sus etapas las varias vidas complementarias de don Santiago: poeta pedestre, novelista, microbiólogo, investigador de la psicología humana, patriota, regeneracionista, contertulio de cafés, por supuesto cultivador ininterrumpido de

la histología del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados.

Es de destacar, a mi juicio, la riquísima iconografía que acompaña a la obra, en su mayor parte procedente de los fondos de la Biblioteca y Museo Históricomedicos de la Universidad de Valencia, que prestan carácter de primicia a muchas de las ilustraciones, no sólo del propio Cajal o de su obra sino también del mundo en que vivió y de los personajes que en su entorno conoció, trató y frecuentó.

Al concluir la lectura de este libro, apasionante por el tema y amenísima por su estilo, el lector puede confirmar que se ha cumplido el objetivo que López Piñero se propone en este nuevo acercamiento a Cajal: “Frente a las deformaciones... que implica su imagen tópica, me he esforzado especialmente —escribe en Nota preliminar— en poner de relieve la integración de la obra de Cajal en la tradición científica española y en la actividad científica de su tiempo, tanto en España como en el resto de Europa”. Así es, en efecto. Lo cual no es óbice para que también al final de la lectura quede de nuevo de manifiesto la genialidad de una figura irreplicable, cuya profunda influencia en las neurociencias y otros campos de la biomedicina se ha mantenido, constituyéndose en uno de los autores más citados por la comunidad científica internacional.

No podía dejar López Piñero de ocuparse de los discípulos más directos de Cajal, y a ellos dedica las páginas finales de su biografía. Entre ellos, si no directamente discípulo al menos decisivamente influenciado por él, se encuentra Pío del Río-Hortega. Siempre ha sido motivo de controversia, al margen de su obra, el oscuro episodio de la erosionada relación con el maestro, no totalmente esclarecida en sus últimas motivaciones. A ella alude también López Piñero. Pero el tema queda meramente esbozado, como esbozada queda solamente su obra ulterior a la separación del entorno del maestro. “No es este lugar oportuno —señala el biógrafo— para dar noticia de sus trabajos postreros, que estuvieron totalmente dedicados a la estructura de la epífisis, la histopatología de los tumores neurológicos y al sistema nervioso vegetativo.”

De ahí el sentido de complementariedad del otro libro que me ocupa, el de Pedro Cano Díaz, que ofrece lúcido conocimiento de esta importante perspectiva de la escuela neurohistológica española. Pedro Cano, tras muchos

años de investigación consagrada a la vida y a la obra de Pío del Río-Hortega, elaboró una tesis doctoral, brillantemente defendida en 1971, que ahora, tres lustros después, ve la luz en forma de libro.

Dos partes constituyen la estructura de la obra: una primera, dedicada a Río-Hortega en tanto que *hombre, hombre de ciencia y científico español*, esto es, la biografía de la persona de don Pío, en la que pormenorizadaamente nos expone su formación, sus proyectos, sus sueños y luchas, sus logros primeros. Es en esta parte donde Cano alude y explica el famoso enfrentamiento de Cajal con Río-Hortega, el cual, a juicio del autor, y pienso que muy atinadamente, hay que considerar más bien un conflicto no con el propio Cajal sino con su “grupo”.

La parte segunda del libro, la más amplia, se dedica a la obra científica de Río-Hortega; varios aspectos se muestran y subrayan en ella: el técnico —con la historia de su descubrimiento del método de tinción del carbonato de plata—, el investigador en la histología general, normal y patológica, el ya más concreto de cultivador indiscutible de la histoneurología, con sus fundamentales descubrimientos en el ámbito de la neuroglía y, por fin, sus investigaciones oncológicas. Es de destacar, que su exposición del tema aparece considerada en dos planos sucesivos: cronológica y sistemáticamente ofrecidos, lo que ayuda a su mejor entendimiento. Concluye la obra con un capítulo titulado “La lección de Río-Hortega”, en la que ésta nos es ofrecida a través de su vida, de su obra y de su magisterio.

Otra vuelta en torno a la escuela neurohistológica española. De una parte, la excelente biografía de José María López Piñero, que ayuda a conocer un Ramón y Cajal desmitificado, con lo que entiendo que todavía adquire mayor relieve su personalidad humana y científica. De otro lado, la excelente biografía de Pedro Cano Díaz, que permite conocer mejor la vida y obra de Pío del Río-Hortega, sobre todo en un momento en el que, fallecidos ya buena parte de sus más directos discípulos, su memoria precisaba esta aportación. Soy testigo de excepción del casi total olvido que en tierras argentinas, especialmente en La Plata, ofrecen hoy aquella vida y aquella obra. Por tanto, dos oportunos libros, una vuelta más en torno a las murallas de Jericó, tratando de completar los círculos que permitan un día, este es el sueño de quien aquí glosa estas lectu-

ras, la elaboración de una cabal y total historia de la escuela neurohistológica española. (A.A.)

CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD EN LA INGLATERRA DEL SIGLO XVII, por Robert K. Merton. Alianza Editorial; Madrid, 1984. Cuando en 1973 Norman W. Storer editó el compendio de artículos de R.K. Merton *The Sociology of Science*, pudo reunir cinco libros y unos sesenta y cinco artículos, veintitantos de los cuales se incluían bajo las tapas de aquella publicación. Esos eran los títulos con los cuales Merton podía ser presentado por Storer, si no como fundador de la sociología del conocimiento o de la ciencia, sí como uno de los creadores de los patrones iniciales y más influyentes, por el momento, de dicha disciplina.

De los estudios incluidos en la recopilación de Storer sólo una media docena son anteriores al libro que nos ocupa aquí, y de ellos casi todos están relacionados con él. En términos generales, pues, podemos decir que este libro viene a constituir la primera obra de Merton a la vez que el primero de sus temas y, junto con ello, el punto de partida de su método sociológico de los problemas que han sido objeto de su estudio durante casi 40 años.

Si tenemos presente, para reconstituir en parte la ubicación intelectual de esta inicial obra de Merton, cuál es la filiación intelectual que él mismo reconoce –Sorokin, Parsons, Sarton, Henderson, Whitehead, y otros menos confesados, pero igualmente presentes, Boris Hessen, G.N. Clark, Weber– podemos considerar que Merton ha de hallarse entre los sociólogos de primera época, cuyos métodos no habían sufrido las depuraciones conceptuales introducidas por la sociología crítica. Por ello, este libro no resulta pionero en 1938, pese a ser una tesis doctoral, o lo es en muy pequeña medida.

Con los métodos de la sociología al uso, y un cierto instrumental métrico, del que ya Sarton había obtenido buenos resultados, Merton decidió abordar su trabajo acotando tiempo y espacio. Elige el siglo XVII en el espacio cultural inglés. La primera consideración que podemos hacer aquí es si tal acotación es acertada. ¿Resulta tan obvia la unidad secular como para encerrar a sus cien años en límites estancos? En particular ese siglo inglés con sus rupturas interiores, su trasiego de hombres de ciencia con el continente y sus cambios sociales rápidos parece poco uniforme, por una parte, y poco inglés, por otra.

Pero si hacemos sociología de esta elección mertoniana acaso resulte que sea deudora de los estudios, publicaciones y tendencias de las escuelas que están creando las bases de la historia de la ciencia sobre la acumulación de documentos procedentes de esa centuria.

Por otra parte hay que reconocer que la idea de hallar algunas bases sociológicas para el fenómeno del nacimiento y consolidación de la ciencia moderna ya circulaba entre los estudiosos de la época; baste recordar el congreso de Londres de 1932 y el interés que suscitó la aportación al mismo de Boris Hessen sobre los supuestos sociológicos de la obra de Newton. No se puede evitar la impresión de que lo que intentara Hessen para el caso de Newton, lo intenta aquí Merton de modo más general y desde una perspectiva mucho más matizada o equilibrada, ampliando tiempo y espacio. Con intención o sin ella, este libro parece una réplica al materialismo de Hessen, utilizando la estrategia de subsumir el fenómeno “Newton” en otro más amplio, “siglo XVII inglés”, dando con ello por descontado que quien da cuenta de la ciencia inglesa del XVII, la da, por lo mismo, del propio Newton.

En suma, mi sospecha es que, más allá del propio valor de los estudios y métodos de este libro, subyace una contrapropuesta de métodos y supuestos sociológicos y filosóficos frente a la concepción marxista del problema.

Curiosamente, la apelación weberiana al ethos puritano (tema central hasta el capítulo VI) implica una censura de la sociología de la ciencia de corte materialista: se esfuerza en mostrar que determinados elementos culturales, ideas o ideales tienen eficacia social no menor que las urgencias burguesas de la industria y del comercio. Pero si esta tesis, en su formulación general, es difícil de ignorar, resulta, en cambio, sospechoso el énfasis de Merton al tratar de vincular la ciencia inglesa al puritanismo y a sus fórmulas morales. De ser esta vinculación condición suficiente habría que inferir que todo puritano inglés fue un científico militante, y de resultar condición necesaria habría que pensar que no hubo científicos no puritanos en el siglo XVII.

En su prólogo de 1970, Merton llama la atención sobre el hecho de que algunas cuestiones principales del libro aún subsisten. Pero cuáles sean y bajo qué forma es otro asunto. Podríamos aceptar que la segunda parte de este estudio, en la cual se analizan relaciones entre ciencia, tecnología, industria, co-

mercio, asuntos militares, etc., ha tenido una continuación cuantitativa y cualitativa muy notable hasta alcanzar a casi todas las áreas de la actividad humana, cosa que no ha ocurrido con los temas de la primera parte. Una y otra línea argumental vienen a constituir el arsenal básico del contextualismo para la interpretación histórica de la ciencia, pero hay una diferencia entre ambas que no ha dejado de ser operativa: el contextualismo cultural centrado en las ideologías dominantes (como el “puritanismo” de Merton) admiten análisis cuyas conclusiones, si las hay, no presentan una contrastación directa. Y un buen ejemplo lo hallará el lector en el capítulo VI de este estudio de Merton. El contextualismo económico-técnico-militar admite, por contra, análisis y contrastaciones más directamente vinculados a explicaciones causales o cuasi-causales, dejando ahora de lado el problema de si el externalismo en su conjunto alcanza a dar cuenta del fenómeno científico o se centra únicamente en su paisaje.

Y aunque Merton toma precauciones sobre el valor de las correlaciones estadísticas, pudiera inducir a creer que algunos índices industriales, económicos o militares pudieran serlo, de paso, de la magnitud de la ciencia, de su desarrollo, importancia y reconocimiento social. Y también aquí me parece oportuno señalar el carácter ambiguo de estos datos externos y de naturaleza mucho más observable. Los perfiles estadísticos de todos estos indicadores externos podrían muy bien parecerse a muchos otros de escasa relevancia para comprender el fenómeno de la ciencia del XVII en Inglaterra, como, por ejemplo, el perfil del desarrollo de cultivos de productos de origen extraeuropeo –maíz, patata y otros– o la abundancia de cometas observados en la segunda mitad de ese siglo.

Pero es claro que con ello no se daría por satisfecho quien se pregunte por las causas y los modos en que pueda residir un fenómeno tan complejo. No obstante, la presión académica de historiadores, sociólogos, antropólogos y economistas sigue tratando de dar cuenta de un fenómeno tan “volcánico” como la ciencia del XVII, y se dedican a ello hasta colecciones enteras (como la de la Clark Library de la Universidad de California en Los Angeles). Y quizás el mérito mayor de este estudio es haber sistematizado tempranamente las grandes líneas de los análisis externalistas sobre la ciencia del siglo XVII inglés. (E.R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL HORMIGON LIGERO

- MANUAL OF LIGHTWEIGHT CONCRETE. Building Research Establishment of the Department of Environment. Watford (Inglaterra); mayo de 1972.
- BÉTONS LÉGERS D'AUJOURD'HUI. Pierre Cormon. Eyrolles, París; 1973.
- HORMIGONES LIGEROS ARMADOS. Helmut Weigler y Karl Sieghart. Gustavo Gili, Barcelona; 1974.
- CONTRIBUCIÓN A UNA NORMA DE CONTROL DE CALIDAD EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN LIGERO. Domingo Pellicer. Primeras Jornadas Nacionales de Control de Calidad en la Construcción. Bilbao; junio de 1977.

MACROESTRUCTURAS DEL UNIVERSO

- SUPERCLUSTERS. J. H. Oort en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 21, págs. 373-428; 1983.
- A POSSIBLE 300 MEGAPARSEC FILAMENT OF CLUSTERS IN PERSEUS-PEGASUS. David J. Batuski y Jack O. Burns en *The Astrophysical Journal*, vol. 299, n.º 1, parte 1, págs. 5-14; 1 de diciembre de 1985.
- INNER SPACE OUTER SPACE. Edward W. Kolb, Michael S. Turner, David Lindley, Keith Olive y David Seckel. The University of Chicago Press, 1986.

ANTI-IDIOTIPOS E INMUNIDAD

- VACCINES UTILIZING INTERNAL IMAGE ANTI-IDIOTYPIC ANTIBODIES THAT MIMIC ANTIGENS OF INFECTIOUS ORGANISMS. Ronald C. Kennedy, Gordon R. Dreesman y Heinz Kohler en *BioTechniques*, vol. 3, n.º 5, págs. 404-409; 1985.
- ANTI-IDIOTYPIC ANTIBODIES AS IMMUNOGENS. *Immunological Reviews*, número 90; abril de 1986.
- ANTI-IDIOTYPIC ANTIBODY VACCINE FOR TYPE B VIRAL HEPATITIS IN CHIMPANZEES. Ronald C. Kennedy, Jorg W. Eichberg, Robert E. Lanford y Gordon R. Dreesman en *Science*, volumen 232, n.º 4747, págs. 220-223; 11 de abril de 1986.

ESTRUCTURA DE LAS CORDILLERAS

- CONSTRAINTS ON THE STRUCTURE OF THE HIMALAYA FROM AN ANALYSIS OF GRAVITY ANOMALIES AND A FLEXURAL MODEL OF THE LITHOSPHERE. H. Lyon-Caen y Peter Molnar en *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, n.º B10, págs. 8171-8191; 10 de octubre de 1983.
- GRAVITY ANOMALIES AND FLEXURE OF THE LITHOSPHERE AT MOUNTAIN RANGES. G. D. Karner y A. B. Watts en *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, n.º B12, págs. 10449-10477; 10 de diciembre de 1983.
- SEISMICITY, FAULT PLANE SOLUTIONS, DEPTH OF FAULTING, AND ACTIVE TECTONICS OF THE ANDES OF PERU, ECUADOR, AND SOUTHERN COLOMBIA. Gerardo Suárez, Peter Molnar y B. C. Burchfiel en *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, n.º B12, págs. 10403-10428; diciembre de 1983.

NUCLEOS ATOMICOS EXOTICOS

- POTENTIAL ENERGY SURFACE MODEL OF COLLECTIVE STATES. M. Seiwert, J. A. Maruhn y W. Greiner en *High-Angular Momentum Property of Nuclei*, dirigido por Noah R. Johnson. Harwood Academic Publishers, 1983.
- MAGIC NUMBERS, REINFORCING SHELL GAPS AND COMPETING SHAPES IN NUCLEI FAR FROM STABILITY. J. H. Hamilton en *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 15, págs. 107-134; 1985.
- ADVANCES IN STUDIES OF NUCLEI FAR FROM STABILITY. J. H. Hamilton, P. G. Hansen y E. F. Zganjar en *Reports on Progress in Physics*, vol. 48, n.º 5, págs. 631-708; mayo de 1985.

PERCEPCION DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO POR EL SENTIDO DEL TACTO

- THE CUTANEOUS "RABBIT": A PERCEPTUAL WORLD. Frank A. Geldard y Carl E. Sherrick en *Science*, vol. 178, n.º 4057, págs. 178-179; 13 de octubre de 1972.

SENSORY SALTATION: METASTABILITY IN THE PERCEPTUAL WORLD. Frank A. Geldard. Lawrence Erlbaum Associates, 1975.

SALTATION IN SOMESTHESIS. Frank A. Geldard en *Psychological Bulletin*, vol. 92, n.º 1, págs. 136-175; julio de 1982.

SIMULACION DEL VUELO

- VISUAL ELEMENTS IN FLIGHT SIMULATION. John Lott Brown en *Aviation, Space and Environmental Medicine*, vol. 47, n.º 9, págs. 913-924; septiembre de 1976.
- THE INTERPRETATION OF VISUAL MOTION. Shimon Ullman. The MIT Press, 1979.
- COMPUTER IMAGE GENERATION FOR FLIGHT SIMULATORS. B. J. Schachter en *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 1, n.º 4, págs. 29-68; octubre de 1981.

LA CUTICULA DE LOS ARTROPODOS

- FINE STRUCTURE OF THE CUTICLE OF INSECTS AND OTHER ARTHROPODS. Barry K. Filshie en *Insect ultrastructure*, vol. 1, págs. 281-312; 1982.
- CUTICLE ULTRASTRUCTURE WITH RESPECT TO THE LIPID WATERPROOFING BARRIER. Neil F. Hadley en *The Journal of Experimental Zoology*, vol. 222, n.º 3, págs. 239-248; 1 de septiembre de 1982.
- BIOLOGY OF THE INTEGUMENT, VOL. 1: INVERTEBRATES. Dirigido por J. Be-reiter-Hahn, A. G. Matoltsy y K. Sylvia Richards. Springer-Verlag, 1984.

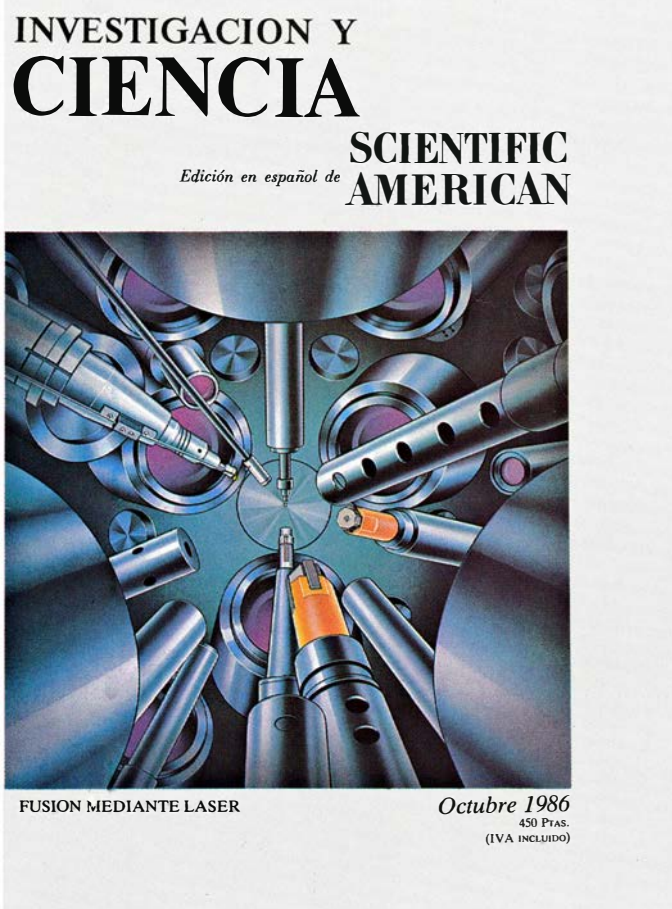
JUEGOS DE ORDENADOR

- MICROCOMPUTER DISPLAYS, GRAPHICS, AND ANIMATION. Bruce A. Artwick. Prentice-Hall, Inc., 1984.
- 40 GREAT FLIGHT SIMULATOR ADVENTURES. Charles Gulick. COMPUTE! Publications, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

- SUPERHEATED ICE: TRUE COMPRESSION FRACTURES AND FAST INTERNAL MELTING. Charles A. Knight y Nancy C. Knight en *Science*, vol. 178, n.º 4061, págs. 613-614; 10 de noviembre de 1972.
- TYNDALL FIGURES AT GRAIN BOUNDARIES OF PURE ICE. Shinji Mae en *Nature*, vol. 257, n.º 5525, págs. 382-383; 2 de octubre de 1975.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



FUERZAS NUCLEARES ESTRATEGICAS DE GRAN BRETAÑA Y FRANCIA, por John Prados, Joel S. Wit y Michael J. Zagurek

Podrían ver cuadruplicado su arsenal dentro de diez años. Aunque hasta ahora han quedado excluidas de los tratados de limitaciones de armas, quizá conviniera contar con ellas en futuras reuniones de las dos superpotencias.

CUASICRISTALES, por David R. Nelson

Materiales de reciente descubrimiento, encierran un orden desconocido, a medio camino entre el cristalino y el amorfo. Para desentrañar su estructura se recurre a la teoría matemática del teselado.

TRANSPLANTES EN EL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL, por Alan Fine

Neuronas embrionarias transplantadas establecen conexiones que mantienen su funcionalidad en el cerebro y espina dorsal del adulto, algo que hasta ahora venía considerándose imposible.

AVANCES EN LA FUSION POR LASER, por R. Stephen Craxton, Robert L. McCrory y John M. Soures

Los haces de láser infrarrojos, transformados en longitudes de onda más cortas por medio de cristales ópticos, calientan el hidrógeno pesado hasta una temperatura de 100 millones de grados. ¿Cómo sacarles partido en el campo de la energía de fusión?

ORIGEN DEL MAIZ, por Paul C. Mangelsdorf

Si atendemos a las conclusiones del autor, el maíz moderno proveniría de un doble origen: de un híbrido de maíz primitivo y de una forma perenne del teosinto silvestre.

NICHOS TERMICOS DE LA LUBINA LISTADA, por Charles C. Coutant

Parece ser que la temperatura preferida del agua cambia con la edad del pez. El hacinamiento en las zonas óptimas pudiera ser la razón por la que determinadas poblaciones no logran prosperar.

¿COMO Y CUANDO SURGIO LA CIVILIZACION DE LOS MAYAS?, por Norma Hammond

Se le atribuyó una aparición repentina. La historia opina hoy que sería, por contra, un proceso largo, cuyos inicios se remontan mucho más lejos que la fecha establecida del 300 de nuestra era cristiana.

FRAGILIDAD DE LA PLUVIELVA AMAZONICA, por Christopher Uhl y Juan Saldarriaga

Tras las perturbaciones recientes en algunas zonas se requerirán periodos de tiempo dilatadísimos hasta lograr la recuperación del bosque. Los autores proponen sistemas alternativos de explotación racional.

**INVESTIGACION Y
CIENCIA**

